



Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente

Gerrit Schmidt

Berichte aus dem DLR-Institut
für Verkehrssystemtechnik

Band 7



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Haptische Signale in der Lenkung:
Controllability zusätzlicher Lenkmomente

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Gerrit Frederik Schmidt
aus: Lübeck

eingereicht am 11.06.2009
mündliche Prüfung am 08.09.2009

Referenten: Prof. Dr. Karsten Lemmer
Prof. Dr. Mark Vollrath

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 7

**Haptische Signale in der Lenkung:
Controllability zusätzlicher Lenkmomente**

Gerrit Schmidt

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.7

Braunschweig, im Oktober 2009

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Gerrit Schmidt

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Die Untersuchung von Lenkungseingriffen und den Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System ist das Thema der im vorliegenden Band veröffentlichten Dissertation. Die Arbeit steht im Kontext der stetig steigenden Bedeutung der aktiven Sicherheit. Dabei sollen Assistenzsysteme den Fahrer von monotonen Tätigkeiten entlasten und bei komplexen Vorgängen gezielt unterstützen. Eine besondere Bedeutung kommt Systemen zu, die ein Abkommen von der Fahrbahn und damit eine Vielzahl tödlicher Unfälle vermeiden. Haptische Eingriffe über Zusatzlenkmomente zeigen dabei ein großes Potential für die Spurführungsunterstützung. Die vorliegende Arbeit behandelt die zentrale Frage, wie die Controllability bei zusätzlichen Lenkmomenten als haptische Unterstützung gewährleistet werden kann. Sie leistet damit einen Beitrag zum Verstehen des Fahrers und seiner Handlungen, das die Basis für eine wirksame aktive Sicherheit bildet.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg¹.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Betreuern Prof. Dr. Karsten Lemmer und Prof. Dr. Mark Vollrath für die Unterstützung der Arbeit bedanken. Zum einen für die wissenschaftliche Betreuung, zum anderen für die förderlichen Hinweise und die konstruktive Kritik. Besonders wertvoll für mich war dabei der interdisziplinäre Charakter, den beide durch ihre jeweiligen Hintergründe in die Arbeit gebracht haben.

Gleichzeitig gilt mein außerordentlicher Dank Dr. Miklós Kiss, der als mein fachlicher Vorgesetzter bei der Volkswagen AG die Möglichkeit geschaffen hat, dieses Thema sowohl anwendungsbezogen aber auch mit der notwendigen wissenschaftlichen Freiheit angehen zu können. In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei allen Kollegen, Praktikanten und Diplomanden des Teams *Bedienkonzepte und Fahrer* und der gesamten Abteilung *Fahrzeugdynamik* für die gute Zusammenarbeit bedanken. Es hat wirklich Spaß gemacht und motiviert, die Arbeit in so einem tollen Umfeld bearbeiten zu können.

Unter den Kollegen möchte ich ein besonderes Dankeschön an Ina Petermann, Dr. Stephan Scholz und Simon Karrenberg für die Kritik und Korrektur der vorliegenden Arbeit richten. Dr. Boris Buschardt und Dr. Michael Rohlf s möchte ich danken für die weiteren fachlichen Anregungen und die Möglichkeit, meine Forschungsergebnisse im Umfeld der Serienentwicklung einfließen zu lassen.

Weiter möchte ich mich sehr bei Prof. J. Christian Gerdes, Dr. Joshua Switkes und Kirsten Talvala bedanken, die mich während meiner Zeit in Stanford sehr inspiriert und auch unterstützt haben. Die Zeit der gemeinsamen Arbeit empfand ich als außergewöhnlich bereichernd.

Eigentlich kaum etwas gemacht haben Thomas Eigel und Frank Schroven. Aber ohne ihre Gegenwart wäre die Zeit lange nicht so interessant, bereichernd und auch lustig gewesen.

Schließlich danke ich ganz besonders meinen Eltern für ihre beständige Unterstützung. Sie haben dadurch maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen.

Braunschweig, im September 2009

Gerrit Schmidt

¹ Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind jedoch nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	iii
Vorwort des Autors	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis.....	xv
Kurzfassung	xvii
Abstract	xix
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Unterstützung der Querführung durch Spurhaltesysteme.....	5
2.1.1 Systemumsetzungen zur Unterstützung der Querführung	5
2.1.2 Systemaufbau und Komponenten	9
2.1.3 Zusammenfassung.....	16
2.2 Empirische Studien zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Spurführungssystemen	16
2.2.1 Vorteile der Assistenz durch Spurführungssysteme	17
2.2.2 Modalität der Warnung und des Eingriffs.....	18
2.2.3 Signalstärke und -form	21
2.2.4 Charakteristik der Regelung des Spurführungssystems	22
2.2.5 Adaptation und Individualisierung von Spurführungssystemen	24
2.2.6 Zusammenfassung.....	25
2.3 Haptische Signale in der Lenkung	27
2.3.1 Das Lenkrad als haptische Schnittstelle im Fahrzeug	27
2.3.2 Wahrnehmung haptischer Signale beim Menschen	28
2.3.3 Bewegungssteuerung als Reaktion auf haptische Signale.....	29
2.3.4 Bisherige Erkenntnisse zu Lenkmomenten als haptische Signale für Spurführungsassistenz	32

2.3.5 Zusammenfassung.....	33
2.4 Schlussfolgerungen und Fragestellung	34
3 Testmethodik und Versuchsdesign	37
3.1 Der RESPONSE Code of Practice: Controllability von Fahrerassistenzsystemen.....	37
3.2 Vorgehen zur Beschreibung der Auswirkungen von Lenkungseingriffen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion	38
3.2.1 Auswahlkriterien der zu untersuchenden Stichprobe	39
3.2.2 Anforderungen an die Fahrmanöver	39
3.2.3 Ansätze zur Bewertung der Kontrollierbarkeit	40
3.2.4 Die Störungsbewertungsskala	41
3.2.5 Zusammenfassung.....	42
3.3 Beschreibung der durchgeführten Studien	43
3.3.1 Studie 1: Signalparameter und situative Variationen.....	43
3.3.2 Studie 2: Einfluss der Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	47
3.3.3 Studie 3: Einfluss der Fahrsituation und Alterseffekte	50
3.3.4 Studie 4: Replikation und Validierung	52
4 Ergebnisse zu Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten	55
4.1 Auswahl der Fahrsituationen: Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten	55
4.1.1 Variation und Auswahl des Fahrmanövers.....	56
4.1.2 Weiterentwicklung der Prüfsituation	57
4.1.3 Der Spurwechsel: Einfluss der Lenkaktivität auf die Auswirkungen von Zusatzlenkmomenten	58
4.1.4 Die Kurvenfahrt: Einfluss der querdynamischen Ausgangslage und des Ausgangslenkmoments	59
4.1.5 Zusammenfassung.....	61
4.2 Subpopulationen potentiell schwächerer Fahrer.....	62
4.2.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse.....	62
4.2.2 Replikation der Ergebnisse	65
4.2.3 Zusammenfassung.....	66
4.3 Situative Parameter	67
4.3.1 Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit	68
4.3.2 Aktivierte Spurführungsassistenz.....	69
4.3.3 Fahrzeugeigenschaften	71
4.3.4 Zusammenfassung.....	73

4.4	Einfluss der Signalparameter: Der Zielkonflikt von Amplitude und Anstiegssteilheit des Zusatzmoments.....	75
4.4.1	Auswirkungen der Amplitude bei unterschiedlichen Anstiegssteilheiten.....	76
4.4.2	Trade-off von Anstiegssteilheit und Amplitude des Zusatzlenkmoments	79
4.4.3	Validierung der Ergebnisse im Fahrzeug	83
4.4.4	Zusammenfassung.....	85
4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zu Auswirkungen von Lenkmomenten auf das Fahrer-Fahrzeug-System	86
5	Die Führungsgröße des Fahrers.....	89
5.1	Ableitung fahrzeugunabhängiger Parameter	89
5.2	Einfluss der Fahrzeugeigenschaften	91
5.3	Der Einfluss der Kinästhesie	94
5.4	Validierung über Variation des Fahrzeugmodells	96
5.5	Steilheit des Zusatzmomentenanstiegs.....	97
5.6	Variation der Fahrsituation.....	98
5.7	Zusammenfassung	98
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	101
6.1	Gestaltungsempfehlungen für Zusatzlenkmomente im Fahrzeug.....	101
6.1.1	Trade-off von Amplitude und Anstiegssteilheit	101
6.1.2	Die Bedeutung des Fahrmanövers	102
6.1.3	Situative Parameter und Fahrzeugeigenschaften.....	103
6.2	Das Übertragungsverhalten des Fahrers	104
6.2.1	Führungsgröße und sensorische Verarbeitung	104
6.2.2	Reaktionszeit des Fahrers	105
6.3	Evaluation der Controllability von eingreifender Fahrerassistenz	106
6.3.1	Identifikation von Prüfsituationen	106
6.3.2	Zur Messbarkeit der Kontrollierbarkeit.....	107
6.3.3	Das Dilemma potentiell schwächerer Fahrergruppen	107
6.3.4	Fazit zur Testmethodik der Evaluation der Kontrollierbarkeit.....	108
6.4	Weiterer Forschungsbedarf.....	108
6.5	Anwendungen im Fahrzeug und Ausblick	110
	Literaturverzeichnis.....	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt nach [Mue07].	1
Abbildung 2-1: Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen abhängig vom Grad der Automatisierung und Unterstützung des Fahrers.	5
Abbildung 2-2: Spurverlassenswarnsystem AFIL von Citroen [Cit04] bei dem der Fahrer über Sitzvibrationen vor einem Spurverlassen gewarnt wird.	7
Abbildung 2-3: Nissan Cima LKS (aus http://www.nissan.co.jp).	8
Abbildung 2-4: Komponenten eines Spurführungssystems und beispielhafter Aufbau, rechts aus [Naa92].	10
Abbildung 2-5: CMOS Kameramodul der Firma ADC (links) und Screenshot des Spurtrackers nach Bildverarbeitung [Rei07, S.11].	10
Abbildung 2-6: Darstellung des Magnethagelverfahrens (mitte): In die Fahrbahn einzubringende Magneten (links) und Anordnung der Magnetometer an der Vorderseite des Fahrzeugs (rechts) [ZST98, S.8f].	11
Abbildung 2-7: Berechnung Distance to Line Crossing auf gerader Strecke (links) und bei gekrümmter Fahrspur (rechts) nach [VBD00].	12
Abbildung 2-8: Fuzzy Anpassung des VRBS abhängig von y und y'^2 [PG03].	12
Abbildung 2-9: Darstellung der Potential Field Funktion und Beschreibung der Modellgrößen Vorausschau x_{la} , Gierwinkelfehler $\Delta\psi$, aktuelle und vorhergesagte Querabweichung von der Spurmitte e bzw. e_{la} [STS+08].	13
Abbildung 2-10: Aufbau einer elektromechanischen Servolenkung EPS [VW07].	14
Abbildung 2-11: Modell multipler Ressourcen, erweitert nach [Wic84].	15
Abbildung 2-12: Augenbewegungswinkel bei Systemunterstützung 20% (links) und 100% (rechts) [ITK+00].	18
Abbildung 2-13: Vergleich der Reaktionszeit (links) und der maximalen Querabweichung (rechts) bei haptischer (torque) gegenüber akustischer Warnung (sound) [SGK+98].	19
Abbildung 2-14: Verringerung der Dauer der Spurabweichungen als Differenz zur Referenz ohne Spurführungsassistentz bei unterschiedlichen Warnkonzepten (links) und die bewertete Akzeptanz [EFN+08].	19
Abbildung 2-15: Vergleich der Reaktionszeiten zwischen verschiedenen Signalen bei Erstkontakt ("Unpredicted") und weiteren Signaldarbietungen ("Predicted") [SJ03].	20
Abbildung 2-16: Vergleich der maximalen Querabweichung bei richtiger ("Correct Strategy") und bei falscher Interpretation ("Incorrect Strategy") des pulsierenden Lenkmoments "pulse-like steering torque" [SJ03].	21
Abbildung 2-17: Wirksamkeit von Heading Control bei unterschiedlichen Auslegungen des Systemeingriffs und Momentengenerierung bei fahroptimierter Variante [Naa92].	22
Abbildung 2-18: Bereichsabhängiges Profil des Lenkmomentalgorithmus [LC95].	23
Abbildung 2-19: Von den Fahrern bevorzugte HC-Auslegungen abhängig von der Führungsintensität [KVT01].	24

Abbildung 2-20: Rezeptive Felder und Reizantworten von Mechanosensoren [RBL02].	29
Abbildung 2-21: Frequenzabhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle für das Vibrationsempfinden [Sch93b] und bei periodischen Lenkmomentänderungen [Bus03].	29
Abbildung 2-22: Patellarsehnenreflex. Bei Aktivierung der Muskelspindel eines Muskels aktiviert eine IA-Afferenz über eine direkte synaptische Verschaltung das α -Motoneuron desselben Muskels, der daraufhin kontrahiert [Sch03].	30
Abbildung 2-23: Folgeregelung mit Zwei-Freiheitsgrad-Struktur (Horowitz, 1963).	31
Abbildung 2-24: Modell der Ebenen der Handlungssteuerung [Ras83].	31
Abbildung 2-25: Geschätzte Unterschiedsschwellen (in N, mit $r=0.19m$) bei verschiedenen Ausgangslenkmomenten [Sch94]. Differenzschwellen für Lenkmomentänderungen in Abhängigkeit von der Übergangszeit [Bus03].	33
Abbildung 3-1: Durch Code of Practice definierter Entwicklungsprozess für Fahrerassistenzsysteme [PRE06].	37
Abbildung 3-2: Fahrleistungsbezogenes Risiko der Unfallverursachung Pkw/Pkw-Unfälle von 1000 Personen pro 1 Million Fahrkilometer [HUK94, S. 43].	39
Abbildung 3-3: Skala zur Bewertung der Lenksystemstörungen [NK03].	41
Abbildung 3-4: Übersicht der durchgeführten Studien mit den jeweils variierten Faktoren und der Hauptfragestellungen mit Kapitelangabe. Die pro Fragestellung betrachteten Studien sind grau hinterlegt dargestellt.	43
Abbildung 3-5: Versuchsfahrzeug und schematischer Aufbau des Fahrparcours.	45
Abbildung 3-6: Zeitlicher Verlauf der Zusatzmomente für die Bedingung Sprung (links oben) und Rampe (links unten) und beispielhafter Verlauf des Lenkmoments bei Spurhalteassistent vor Aufschaltung eines Zusatzmoments (links).	45
Abbildung 3-7: Appliziertes und tatsächliches Lenkmoment und die Verläufe von Lenkradwinkel (LW) und -geschwindigkeit (dlw) (links). Beispielhafter Zeitverlauf des Lenkwinkels bei mehreren Einzelmessungen mit gleichem Zusatzlenkmoment.	46
Abbildung 3-8: Spannweite der Gierrate nach Aufschaltung eines Zusatzlenkmoments	47
Abbildung 3-9: Fahrsimulator (links) und Darstellung während des Trainings (rechts).	48
Abbildung 3-10: Zeitlicher Verlauf von Soll-Zusatzmoment, Lenkradwinkel und -geschwindigkeit (links). Störungsbewertungsskala [NK03] (rechts).	50
Abbildung 3-11: Realisierte Fahrsituationen innerhalb des Fahrparcours.	51
Abbildung 4-1: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.1 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.	55
Abbildung 4-2: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dem Zeitpunkt des Lenkradwinkelmaximums (rechts) für Geraden und Kurven.	56
Abbildung 4-3: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für Kurve und Gerade.	57
Abbildung 4-4: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und Bewertung der Störungsauswirkungen (rechts). Vergleich der Aufschaltungen im Spurwechsel mit Engstelle.	58
Abbildung 4-5: 1. Maximum des Lenkradwinkels (links) und Gierreaktion (rechts) nach Auslösung des Zusatzmoments in den Situationen Kurve 1 und 2 und Engstelle.	59

Abbildung 4-6: Bewertung der Störungsauswirkungen. Links Vergleich der Situationen Kurve 1 und 2 mit der Engstelle und rechts abhängig von der Richtung des Zusatzmoments. ...	60
Abbildung 4-7: Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und Gierreaktion des Fahrzeugs (rechts) in Abhängigkeit der Richtung des Zusatzmoments relativ zur Engstelle.....	60
Abbildung 4-8: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.2 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.....	63
Abbildung 4-9: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dessen Zeitpunkt (rechts) pro Altersstufe abhängig von der Amplitude des Zusatzmoments.....	64
Abbildung 4-10: Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach Fahrereingriff (links) und maximale Spannweite der Gierrate (rechts) pro Altersstufe abhängig von der Amplitude des Zusatzmoments.....	64
Abbildung 4-11: Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente (links) und der Abweichung von der Spurmitte (rechts) pro Altersstufe über die Amplitude des Zusatzmoments.....	65
Abbildung 4-12: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente (rechts) pro Altersstufe abhängig vom Gradienten.	66
Abbildung 4-13: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.3 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.....	67
Abbildung 4-14: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und Bewertung der Auswirkungen Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments. Aufschaltung der Zusatzmomente bei 70 und 100km/h.	68
Abbildung 4-15: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments. Aufschaltung der Zusatzmomente bei 70 und 100km/h.	69
Abbildung 4-16: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für sprungförmige Zusatzmomente jeweils mit Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem.....	70
Abbildung 4-17: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und maximale Spannweite der Gierreaktion (rechts) für rampenartige Zusatzmomente. Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem.	70
Abbildung 4-18: Querablage von der Spurmitte (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für rampenartige Zusatzmomente jeweils mit Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem. Die Linie in der linken Abbildung bei 0.83m bezeichnet die zulässige Querabweichung bis zum Überfahren der Fahrspurbegrenzung.....	71
Abbildung 4-19: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und rel. Maximum in der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.	72
Abbildung 4-20: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und Ausregelzeit der Gierbewegung durch den Fahrer (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.	72
Abbildung 4-21: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.....	73
Abbildung 4-22: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.4 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.....	76

Abbildung 4-23: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und rel. Maximum in der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) für Zusatzmomente „Sprung“ und „Rampe“	77
Abbildung 4-24: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und der maximalen Spannweite der Gierrate (rechts) für „Sprung“ und „Rampe“	78
Abbildung 4-25: Maximale Querablage (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für „Sprung“ und „Rampe“	78
Abbildung 4-26: Subjektive Bewertungen der Störungsauswirkungen durch die Zusatzmomente pro Amplitude und Gradient.	81
Abbildung 4-27: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dessen Zeitpunkt (rechts) pro Gradient und Amplitude des Zusatzmoments.	81
Abbildung 4-28: Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und maximale Spannweite der Gierrate (rechts) pro Gradient und Amplitude des Zusatzmoments.	82
Abbildung 4-29: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und darauffolgendes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) pro Gradient des Zusatzmoments.	84
Abbildung 4-30: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und subjektive Bewertungen der Störungsauswirkungen (rechts) durch die Zusatzmomente pro Gradient.....	84
Abbildung 5-1: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis bei Vorgabe von Zusatzmomenten.....	89
Abbildung 5-2: Vorgehen zur Bestimmung der Führungsparameter für den Fahrer bei Anregung durch Zusatzlenkmomente und zur Ableitung fahrzeugunabhängiger Grenzwerte.....	90
Abbildung 5-3: Bewertung der aufgetretenen Gierrate der Fahrzeuge A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).....	92
Abbildung 5-4: Bewertung der aufgetretenen Querbesehleunigung der Fahrzeuge A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).....	93
Abbildung 5-5: Bewertung des aufgetretenen Lenkradwinkels der Fahrzeugvarianten A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).....	93
Abbildung 5-6: Bewertung der aufgetretenen Lenkmomente der Fahrzeugvarianten A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer Anpassung (links).	94
Abbildung 5-7: Vergleich Bewertungen in Fahrzeug A und B gegenüber dem Fahrsimulator in Bezug auf das 1. Maximum des Lenkradwinkels mit linearer Anpassung.	95
Abbildung 5-8: Vergleich Bewertungen in Fahrzeug A und B gegenüber dem Fahrsimulator in Bezug auf die Gierrate (links) und Querbesehleunigung (rechts) mit linearer Anpassung.	95
Abbildung 5-9: Bewertung in Bezug zu aufgetretenen Fahrzeugreaktionen Gierrate und Querbesehleunigung, dem Maximum des Lenkradwinkels und des gemessenen Lenkmoments der Fahrzeuge A, B und C aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer Anpassung.	96
Abbildung 5-10: Bewertung der aufgetretenen Gier- und Lenkungsreaktionen aufgrund der angeforderten sprung- und rampenförmigen Zusatzlenkmomente. Fahrzeugreaktionen ex post kategorisiert; den Kategorien liegen unterschiedliche Häufigkeiten zugrunde.	98
Abbildung 5-11: Bewertung der aufgetretenen Gierreaktionen und Querbesehleunigungen auf gerader Strecke und in der Kurve. Die Fahrzeugreaktionen sind ex post kategorisiert; den Kategorien liegen unterschiedlichen Häufigkeiten zugrunde.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bedingungen und Amplituden der dargestellten Zusatzlenkmomente.	44
Tabelle 3-2: Übersicht über die pro Amplitude gestellten Gradienten der Lenkmomente.	49
Tabelle 3-3: Übersicht über die gestellten Zusatzlenkmomente.	51
Tabelle 3-4: Übersicht über die gestellten Zusatzlenkmomente.	53
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Betrachtung der Fahrsituationen.	62
Tabelle 4-2: MANOVA Pillai's Trace	65
Tabelle 4-3: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Betrachtung von Subpopulationen potentiell schwächerer Fahrer.	67
Tabelle 4-4: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zu situativen Parametern.	75
Tabelle 4-5: Post-hoc T-Tests zu Interaktionseffekt von Amplitude und Gradient.....	82
Tabelle 4-6: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Variation der Signalparameter.	86
Tabelle 4-7: Kurzübersicht der zentralen Ergebnisse von Kapitel 4.	88
Tabelle 5-1: Korrelationen der betrachteten Maße.....	91
Tabelle 5-2: Kurzübersicht der zentralen Ergebnisse von Kapitel 5.	100

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente auf das Fahrer-Fahrzeug-System untersucht. Solche Lenkmomentsignale zeigen großes Potential z.B. bei Spurführungssystemen. So kann der Fahrer sehr schnell auf diese Signale reagieren und gegenüber anderen Signalen sind bessere Leistungen in der Spurführung erreichbar. Allerdings zeigen sich in Einzelfällen falsche Interpretationen dieser Signale. Dies unterstreicht die Wichtigkeit eines angemessenen Designs der Zusatzlenkmomente.

Einerseits leistet diese Arbeit eine Umsetzung der im RESPONSE Code of Practice geforderten Untersuchungsmethodik zur Bewertung der Controllability solcher Eingriffe. Dazu werden unterschiedliche Fahrmanöver untersucht und eine pylonenbegrenzte Engstelle als sensitivstes Manöver identifiziert. Ergänzend werden verschiedene Fahrergruppen betrachtet. Im Fokus stehen ältere Fahrer und Fahranfänger als potentielle Risikogruppen. Hinsichtlich der Auswirkungen von Zusatzlenkmomenten ist jedoch kein Unterschied gegenüber normalen Fahrern feststellbar.

Weiter setzt sich diese Arbeit zum Ziel, die Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente auf das Fahrer-Fahrzeug-System zu analysieren. Hierfür wird ein experimenteller Ansatz in Realfahrzeug und Fahrsimulator mit Normalfahrern gewählt. Als wesentlich wird in dieser Arbeit der wechselseitige Einfluss von Amplitude und Anstiegssteilheit eines Lenkmoments identifiziert. So zeigt sich, dass durch die Begrenzung der Anstiegssteilheit eines Zusatzmoments auch höhere Amplituden für den Fahrer zumutbar bleiben.

Von besonderem Interesse ist die Variation des Fahrzeugübertragungsverhaltens und den Auswirkungen auf die Fahrerwahrnehmung und -reaktion. So ergibt sich, dass das Lenkmoment nicht wesentlich für die Bewertung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer ist. Vielmehr scheint die resultierende Querdynamik die Führungsgröße des Fahrers besser zu beschreiben und fahrzeugübergreifende Grenzwerte für zumutbare Zusatzlenkmomente abzuleiten.

Abstract

This work describes the assessment of the driver's perception and reaction to additional steering torque signals. These additional torque signals represent haptic signals to the driver. By applying these signals it is possible to support the driver in the lateral control task of lanekeeping. Numerous studies have shown advantages of those signals compared to acoustical or visual cues in specific contexts. However, there are singular cases reported in literature where participants misinterpreted the signals and responded incorrectly. Therefore, a careful design of the torque signals is vitally important.

This work provides a methodological approach for investigating the controllability of torque signals according to demands of the RESPONSE Code of Practice. Therefore, the signals are investigated in different driving tasks and a bottleneck maneuver is identified as most sensitive in this context. Furthermore, younger and older drivers are examined as potentially weaker driver groups. The results do not indicate any effect from age on reaction times or perceptions of the signals.

To provide design recommendations, the effects of steering torque signals on the driver-vehicle-system are investigated on a test track and in a driving simulator. The gradient and amplitude of the torque signal show a clear influence, while below a certain gradient the effect of the amplitude disappears. Therefore, it is recommended to limit the gradient of steering torque signals for use in the vehicle to ensure controllability.

With the goal to identify the underlying perception processes, the drivers' subjective assessment of the applied torque correlated to objective measures of vehicle motion. This approach allows identification of the main command variables of the drivers' perception and evaluation. The analyses in this work show vehicle motion parameters as more adequate for estimating the drivers' subjective evaluation than the applied torque or movement in the steering system.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die rasante Entwicklung von Aktorik und Sensorik in gegenwärtigen Kraftfahrzeugen ermöglicht immer weitergehende Konzepte der Fahrerassistenz. Dabei verfolgen diese Konzepte zur Unterstützung des Fahrers das Ziel der Erhöhung des Komforts für den Fahrer über die Entlastung von monotonen Tätigkeiten und die Unterstützung von komplexen Vorgängen bei seiner Fahraufgabe (Abbildung 1-1). Daneben kann mit diesen Zielen eine Erhöhung der Sicherheit über die Vermeidung von Unfällen einhergehen. So erscheint das Abkommen von der Fahrbahn auffällig häufig in Unfallstatistiken z.B. des Statistischen Bundesamtes [Sta08] als Ursache für einen tödlichen Unfall im Straßenverkehr: 33% der 4949 Verkehrstoten sind in ebendiese Unfälle verwickelt. Ähnliches gilt für ganz Europa und die USA. Nach Statistiken der US National Highway Traffic Safety Administration macht das Abkommen von der Fahrbahn 28% aller tödlichen Unfälle aus und führte zu 16551 Unfällen mit Todesfolge [NHT05]. Für ganz Europa bedeutet dies ca. 13800 Tote durch ein Abkommen von der Fahrspur (European Road Safety Observatory). Eine Analyse von 328 solcher Spurverlassensunfälle im Raum Regensburg kommt dabei zu dem Ergebnis, dass beinahe 25% dieser Unfälle mit Hilfe eines Spurführungssystems hätten verhindert werden können [Gru05].

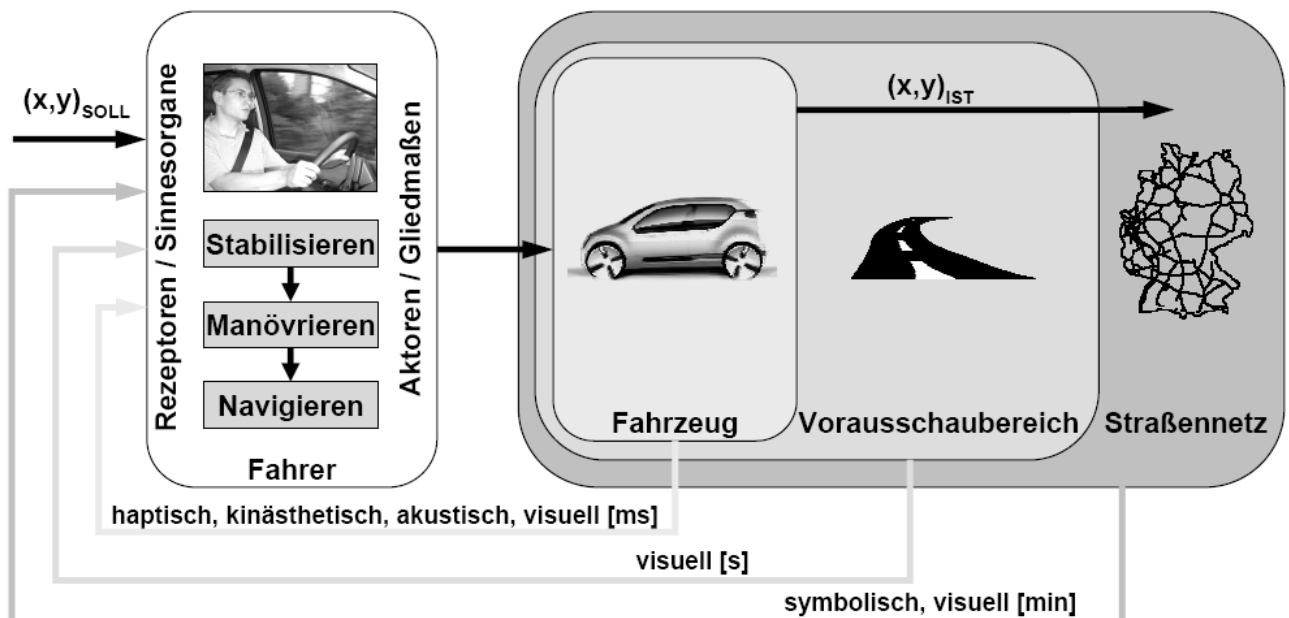


Abbildung 1-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt nach [Mue07].

Diese Zahlen belegen eindrucksvoll den potentiellen Bedarf des Fahrers zur Unterstützung bei der Haltung der Fahrspur. Derartige Ansätze werden in der Literatur in der Regel unter den Bezeichnungen Spurverlassenswarnung und Spurführungsassistenz beschrieben. Erste Umsetzungen solcher Systeme befinden sich bereits im Markt [z.B. Cit04]. Die Mehrzahl dieser Umsetzungen beschränkt sich dabei darauf, den Fahrer über ein drohendes Verlassen der Fahrspur zu informieren. Der Fahrer kann geeignete Gegenmaßnahmen einleiten und das Fahrzeug weiter sicher in der Spur führen. Ein noch größeres Potential besitzen Systeme, die

den Fahrer nicht nur informieren, sondern gleichzeitig unterstützend in die Spurführung eingreifen. Allerdings muss bei diesen Eingriffen gewährleistet werden, dass der Fahrer stets angemessen unterstützt wird und das Fahrzeug jederzeit kontrollieren kann. Dieses Konzept der Kontrollierbarkeit (Controllability) ist nach dem RESPONSE Code of Practice ein zentrales Kriterium bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen [PRE06]. Diese Anforderung wird auch an das Design solcher Systeme mit haptischen Eingriffen gestellt, die empirisch betrachtet und belegt werden müssen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit setzt sich zum Ziel, Gestaltungsempfehlungen für haptische Signale in der Lenkung zu liefern. Solche haptischen Signale in Form zusätzlich aufgeschalteter Lenkmomente ermöglichen die Unterstützung des Fahrers bei der Spurführung des Fahrzeugs und finden ihre Anwendung in Spurführungssystemen. Zur Ausgestaltung dieser haptischen Assistenz fehlen bislang noch grundlegende Erkenntnisse.

Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation von Einflussparametern solcher haptischen Eingriffe in Form zusätzlicher Lenkmomente, die auf die Wahrnehmung und die Reaktion des Fahrers einwirken. Hierzu werden Faktoren der Signalgestaltung als auch des Fahrzeugverhaltens und der Fahrumgebung betrachtet. Über die Beschreibung der Wirkweise der Einflussfaktoren kann abgeleitet werden, wie ein zusätzliches Lenkmoment unter bestimmten Umständen gestaltet werden muss. Die Signale sollen dabei für den Fahrer immer sicher wahrnehmbar und gleichzeitig jederzeit übersteuerbar und kontrollierbar sein. Damit verbunden ist die Frage nach maximal zumutbaren Zusatzmomenten in der Lenkung zur Spurführungsassistenz. Dazu gilt es von methodischer Seite, ein geeignetes Testdesign und -szenario abzuleiten, mit dessen Hilfe die Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente auf den Normalfahrer evaluiert werden können. Neben der Bewertung der Kontrollierbarkeit [PRE06] von Zusatzlenkmomenten im Fahrzeug versucht diese Arbeit weiter, den Fahrer und seine Übertragungseigenschaften bei solchen haptischen Anregungen zu beschreiben. Über die Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente wird versucht, die eigentliche Führungsgröße des Fahrers bei der Querregelung des Fahrzeugs zu identifizieren.

Diese Arbeit liefert eine umfassende Beschreibung von Einflussfaktoren bei der Wahrnehmung von zusätzlichen Lenkmomenten, die bei der Ausgestaltung solcher Signale auch für andere Assistenzsysteme hilfreich sein können. Besonders hervorzuheben ist der identifizierte Trade-off von Amplitude und Anstiegssteilheit eines Zusatzmoments. So ist nicht allein die Stärke eines Zusatzmoments wesentlich, sondern vielmehr das Zusammenspiel von Stärke und Dynamik eines solchen Eingriffs. Eine Begrenzung der Anstiegssteilheit erhöht die zumutbare und kontrollierbare maximale Amplitude. Gleiches gilt umgekehrt, wobei eine ausreichende Begrenzung der Anstiegssteilheit den Einfluss der Amplitude sogar fast vollständig verschwinden lässt. Allerdings zeigt sich, dass nicht die angeforderten Zusatzmomente die Wahrnehmung des Fahrers bestimmen. Als bedeutsam erscheinen dagegen Kennwerte der querdynamischen Reaktion des Fahrzeugs. Über die Auflösung dieses Zusammenhangs wird beschrieben, wie die Ergebnisse auf weitere Fahrzeuge übertragen werden können.

Die durchgeführten Studien in Realfahrzeug und Simulator liefern darüber hinaus einen Vorschlag zur Versuchsmethodik für die Evaluation der Kontrollierbarkeit von unterstützenden Lenkungs Eingriffen. Neben Kriterien der Bewertung werden insbesondere unterschiedliche Fahrmanöver evaluiert. Dabei scheint eine Geradeausfahrt mit Begrenzung der Spurbreite durch eine Pylonengasse die höchsten Anforderungen zu stellen und erweist sich als das sensitivste Fahrmanöver. Die Auswirkungen gleicher Zusatzmomente werden in diesem Fahrmanöver im Mittel als mindestens genauso stark beschrieben, wie in der Kurve oder während eines Spurwechsels.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit liefert in Kapitel 2 einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und der Forschung von Fahrerassistenzsystemen zur Unterstützung der Spurführung des Fahrzeugs. Dort werden zunächst unterschiedliche Möglichkeiten des Aufbaus und der Umsetzung von Spurführungssystemen und Spurverlassenswarnern dargestellt (Abschnitt 2.1). Abschnitt 2.2 beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit fokussierte Ausgestaltung der Mensch-Maschine Interaktion. Dort wird insbesondere diskutiert, wie der Fahrer optimal über ein drohendes Spurverlassen informiert und gleichzeitig bei der Spurhaltung unterstützt werden kann. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich als eine Variante der aktive Eingriff in die Querverführung über die Aufschaltung von zusätzlichen Lenkmomenten. Über diese haptischen Signale kann der Fahrer über ein drohendes Spurverlassen informiert werden und gleichzeitig das Fahrzeug zur Spurmitte hin ausgerichtet werden. Abschnitt 2.3 beschreibt schließlich die Wahrnehmungszusammenhänge beim Menschen bei solchen haptischen Signalen, die im Fahrzeug über zusätzliche Lenkmomente dargestellt werden. Es zeigt sich, dass bislang nicht vollständig geklärt ist, wie solche haptischen Signale vom Fahrer wahrgenommen und verarbeitet werden. Derartige Kenntnisse erscheinen jedoch zur optimalen Ausgestaltung einer haptischen Unterstützung notwendig. So muss gewährleistet sein, dass der Fahrer die Signale schnell und eindeutig wahrnimmt. Gleichzeitig gilt es, den Fahrer durch diese Eingriffe nicht zu bevormunden und seine Kontrolle über das Fahrzeug zu beeinträchtigen.

Ausgehend vom derzeitigen Forschungsstand (Kapitel 2) wird der Bedarf zur experimentellen Untersuchung der Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente als haptische Signale zur Spurführungsassistenz deutlich. Kapitel 3 diskutiert die methodische Herangehensweise an eine Untersuchung im Kontext des Systems Fahrer-Fahrzeug. Daraus werden Rahmenbedingungen für ein Versuchsdesign abgeleitet, mit dem es möglich ist, die Auswirkungen von zusätzlichen Lenkmomenten auf die Fahrerwahrnehmung und -reaktion zu bewerten. Innerhalb dieses Kapitels werden Design und Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fahrversuche in Simulator und Realfahrzeug erläutert.

Kern dieser Arbeit bilden die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Fahrversuche zum Einfluss haptischer Signale. In diesem Kapitel werden unterschiedliche Einflussfaktoren auf Seiten des haptischen Signals, wie Amplitude und Anstiegssteilheit eines Zusatzlenkmoments, als auch auf Seiten der Fahrsituation, des Fahrzeugs und des Fahrers untersucht. Dabei ist bislang noch nicht geklärt, welche der Zustandsgrößen des Fahrzeugs vom Fahrer wahrgenommen werden. So werden in dieser Arbeit zwar Zusatzlenkmomente variiert. Ob der Fahrer diese oder deren Auswirkungen in den fahrdynamischen Reaktionen des

Fahrzeugs als bedeutsam wahrnimmt, versucht Kapitel 5 zu beleuchten und behandelt die Frage nach der Führungsgröße des Fahrers. Ziel ist es, die Wahrnehmung des Fahrers besser zu verstehen und sein Verhalten unabhängig vom jeweiligen Fahrzeug beschreiben zu können.

Die Ergebnisse der Kapitel 4 und 5 münden schließlich in Gestaltungsempfehlungen für das Design von Zusatzlenkmomenten im Fahrzeug (Abschnitt 6.1). Diese Empfehlungen sollen Hinweise für die Gestaltung von Zusatzlenkmomenten auch außerhalb des Kontextes Spurführungssystem liefern, die bei der Entwicklung weiterer Assistenzfunktionalitäten herangezogen werden können. Gleichzeitig fasst Abschnitt 6.2 die Erkenntnisse zum Übertragungsverhalten des Fahrers bei Anregung durch zusätzliche Lenkmomente zusammen und versucht einen weiteren Baustein zum Verständnis der Eigenschaften des Fahrers zu liefern. Abschnitt 6.3 führt die Erkenntnisse zur methodischen Herangehensweise bei der Evaluation der Kontrollierbarkeit im Fahrversuch mit Normalfahrern zusammen. Den Abschluss dieser Arbeit bildet ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf und mögliche Anwendungen der Erkenntnisse im Fahrzeug.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Unterstützung der Querführung durch Spurhaltesysteme

Mehrere Fahrzeughersteller bieten in ihren gegenwärtigen Fahrzeugen Systeme zur Unterstützung der Querführung des Fahrzeugs an. Die einzelnen Systeme unterscheiden sich dabei sehr. Dieser Abschnitt versucht, die unterschiedlichen am Markt befindlichen Systeme darzustellen und zu klassifizieren. Im Weiteren werden der Aufbau und die Komponenten eines Spurführungssystems dargestellt und auf die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eingegangen.

2.1.1 Systemumsetzungen zur Unterstützung der Querführung

Bei einer Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen ist zu beachten, dass die Assistenz, also die Unterstützung des Fahrers nach dessen Regeln und Erwartungen [Rei98], unterschiedlich eindringlich erfolgen kann. So liefern einige Systeme dem Fahrer Informationen über Fahrzeug und Umwelt, während andere ganze Teilbereiche des Fahrens übernehmen und ihn von diesen Aufgaben entlasten. Die Assistenten haben damit im Wesentlichen drei Aufgaben:

- Informationen zur Verfügung stellen,
- Situationen bewerten und
- den Fahrer bei der Durchführung seiner Aktionen unterstützen.

Eine Klassifikation von Fahrerunterstützungssystemen lässt sich demzufolge hinsichtlich unterschiedlichen Ausführung des Eingriffs und des Automatisierungsgrads treffen [WEN+01; HB03]. Dabei kann zwischen informierenden, warnenden, assistierenden, teilautonomen und vollautonomen Systemen unterschieden werden, die den Fahrer unterschiedlich stark beim Fahren unterstützen (Abbildung 2-1). Während beispielsweise ein informierendes System Wahrnehmungsdefizite des Fahrers ausgleichen kann, übernehmen teilautonome Systeme die Ausführung von Teilbereichen des Fahrens. Die Rolle des Fahrers verschiebt sich dabei vom Ausführenden zum Systemüberwacher.

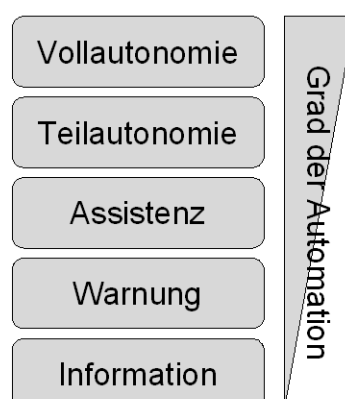


Abbildung 2-1: Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen abhängig vom Grad der Automatisierung und Unterstützung des Fahrers.

Bei näherer Betrachtung der Systeme müssen weitere Klassifikationsebenen berücksichtigt werden. So ist zwischen Systemen mit allein bordgestützter „Intelligenz“ und Systemen, die eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur vorsehen, zu unterscheiden. Während erstere allein auf Sensoren im Fahrzeug zurückgreifen und damit als fahrzeugautonom zu betrachten sind, sind Systeme, die auf Informationen zurückgreifen, die von Sensorik außerhalb des Fahrzeugs erfasst wird, als infrastrukturgestützt zu bezeichnen. Als dritte Klasse ist auch eine Kombination dieser beiden Systemarten denkbar. In diesem Fall werden aus der Infrastruktur bereitgestellte Daten mit Hilfe fahrzeuggestützter Sensorik ergänzt. Dieser Ansatz wird beispielsweise bei modernen Telematiksystemen verfolgt. Vielfach zeigen die Systeme auch unterschiedliche Schwerpunktsetzungen, d. h. sie dienen entweder mehr dem Fahrkomfort oder aber der Fahrsicherheit. Diese Unterscheidung wird hier nicht weiter vertieft. Alle aufgeführten gegenwärtigen Ansätze zählen zu den fahrzeugautonomen Systemen. Infrastrukturgestützte Umsetzungsmöglichkeiten werden in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Im Folgenden werden bekannte Umsetzungen von Systemen zur Unterstützung der Spurhaltung in Bezug auf ihren Grad der Unterstützung bzw. Automation klassifiziert und dargestellt.

Informierende Systeme

Informierende Systeme stellen dem Fahrer Informationen über Fahrzeug und Umgebung zur Verfügung. Dabei handelt es sich häufig um nicht direkt zu erfassende Informationen, wie zum Beispiel die Außentemperatur, die dem Fahrer im Fahrzeug angezeigt wird. Zu den informierenden Systemen zählen nicht-eingreifende Systeme ohne Warnung wie z.B. ein Navigationssystem. In Bezug auf die Unterstützung der Querführung ist denkbar, dem Fahrer stets und beständig eine Rückmeldung über die Qualität seiner Spurhaltung und insbesondere den Abstand zur Fahrspurbegrenzung rückzumelden. In der Regel ist jedoch davon auszugehen, dass dem Fahrer diese Information über den Blick auf die Fahrbahn leichter zugänglich ist und der Nutzen einer reinen Information sehr limitiert ist. Daher gehen Umsetzungen von Systemen zur Unterstützung der Spurführung in der Regel mindestens eine Stufe weiter.

Warnende Systeme

Bewertet ein System zusätzlich die gewonnenen Informationen, so kann es den Fahrer durch entsprechende Signale auf Probleme und Gefahren hinweisen. Ein solches System ist als Warnsystem zu bezeichnen. Für ein System zur Unterstützung der Querführung bedeutet dies ein Warnsystem, das den Fahrer genau dann informiert, wenn das Fahrzeug die Fahrspur zu verlassen droht, sofern ein korrigierender Eingriff von ihm ausbleibt. Dieser Systemtyp ist in der Literatur als Spurverlassenswarnsystem oder Lane Departure Warning (LDW) beschrieben. Es wird nicht in die Querführung eingegriffen, sondern der Fahrer in der Regel über ein akustisches oder ungerichtetes haptisches Signal über das drohende Verlassen der Fahrspur gewarnt. Insbesondere im Bereich der Nutzfahrzeuge kommen solche Systeme mit akustischer Warnung zum Einsatz. Zu nennen sind hier beispielhaft das MAN Lane Guard System (LGS) [MAN02] oder der Telligent Spurassistent aus dem Mercedes-Benz Actros [Dai00a; Dai00b]. Im Pkw-Bereich werden akustische Rückmeldungen nicht allein sondern nur in Kombination mit anderen Signalen eingesetzt. Als Grund hierfür wird der im Vergleich zum Nutzfahrzeug unterschiedliche Fahrkontext genannt: So ist ein akustisches Signal stets für alle Passagiere des Fahrzeugs hörbar und denunziert die mangelhafte Spurführung des Fahrers vor seinen

Passagieren. Ein solches Systemverhalten ist für den Fahrer kaum akzeptabel. Im Pkw bekannte Umsetzungen setzen daher zumeist haptische Signale ein, entweder als Sitzvibrationen, wie beim System AFIL² [Cit04], bei dem die jeweilige Seite der Fahrersitzfläche vibriert auf der ein Spurverlassen droht (Abbildung 2-2), oder in Form von Lenkradvibrationen.

Beispiele für Systeme, die den Fahrer über Lenkradvibrationen warnen sind Audi Lane Assist, BMW Spurverlassenswarnung, Lexus LDW, Nissan Lane Deviation Avoidance (LDA) und Volvo LDW. In der Regel werden die Vibrationen über einen Unwuchtmotor in der Lenkradspeiche oder aber über die Aktorik elektrischer Servolenkungen erzeugt. Neben der haptischen Warnung über das Lenkrad ist es möglich, den Fahrer eskalierend über den Gurtstraffer (Gurtvibrationen) über ein drohendes Spurverlassen zu informieren. Eine solche Umsetzung im Markt ist jedoch nicht bekannt.



Abbildung 2-2: Spurverlassenswarnsystem AFIL von Citroen [Cit04] bei dem der Fahrer über Sitzvibrationen vor einem Spurverlassen gewarnt wird.

Assistierende Systeme

Eine höhere Stufe der Automation des Fahrens stellen assistierende, sprich handlungsunterstützende Systeme dar. Assistierende Systeme sollen Unzulänglichkeiten des Fahrers bei der Fahrzeugführung ausgleichen oder ihn bei der Bewältigung der Fahraufgabe unterstützen und entlasten. In dieser Klasse sind auch eingreifende Spurhalte- oder Spurführungsassistenzsysteme anzusiedeln. Dabei wird der Fahrer durch einen aktiven Eingriff des Assistenzsystems in die Lenkung des Fahrzeugs nicht nur vor dem Spurverlassen gewarnt, sondern gleichzeitig bei einer korrektiven Bewegung unterstützt. Das Fahrzeug wird über zusätzlich aufgebrachte Lenkmomente in Richtung Spurmitte geführt, sofern der Fahrer dies zulässt. Erste Markteinführungen solcher Systeme fanden mit dem Lane Keeping Support (LKS) im Nissan Cima (Abbildung 2-3) [Tsu01] und dem Mitsubishi Proudia in Japan statt. Als erster deutscher Hersteller bietet Volkswagen seit 2008 mit dem System LaneAssist eine Spurhalteassistenz an. Der Mitsubishi Proudia wird seit 1999 mit dem Fahrerassistenzsystem DSS (Driver Support System) angeboten. Die Funktionalitäten des Systems umfassen neben der Längsführung und einer Überwachung des toten Winkels eine Unterstützung der Spurführung. Dem Fahrer wird durch gleichzeitige akustische, visuelle und haptische Signale ein drohendes Verlassen der Fahrspur angekündigt und über ein gerichtetes Lenkmoment korrigierend in die Fahrzeugführung eingegriffen. Das System bleibt jederzeit vom Fahrer übersteuerbar und wird bei Betätigung des Blinkers oder schnellen Lenkbewegungen deaktiviert. So sollen intendierte Spurwechsel und Gefahrensituationen erkannt und nicht durch Systemeingriffe erschwert werden. Das im Nissan Cima realisierte Spurführungssystem LKS (Lane Keeping Support) soll den

² AFIL: « Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne » bzw. „Alarm bei Fahrspurabweichung durch Infrarot Linienerkennung“ [CIT04].

Fahrer auf monotonen Strecken bei langen Fahrten unterstützen. Es wirkt direkt auf die Lenkung und übernimmt die Ausgleichsarbeit für den Fahrer. Die Systemeingriffe sind auf einen maximalen Kurvenradius beschränkt, so dass ein autonomes Fahren nicht möglich ist. Gleichzeitig ist das System mit einer Hands-off Abschaltung ausgestattet, bei der das System deaktiviert wird, wenn der Fahrer die Hände zu lange nicht am Lenkrad hält. Die vom System aufgebrachten Lenkmomente sind lt. Nissan so gering, dass der Fahrer jederzeit die Möglichkeit hat, das System zu übersteuern. Auf dem europäischen Markt werden derzeit lediglich das Lexus LKA (Lane Keep Assist) und mit Beschränkung auf Rechtslenker auch das Honda LKAS (Lane-Keeping Assist System) angeboten. Beide Systeme ähneln in ihrer prinzipiellen Funktionsweise den beiden oben beschriebenen Systemen. Auch hier wird über gerichtete Lenkmomente der Fahrer informiert und gleichzeitig bei der Spurführung aktiv unterstützt.

Von besonderer Wichtigkeit bei dem Eingriff in die Lenkung des Fahrzeuges über zusätzliche aufgeschaltete Lenkmomente ist, zu gewährleisten, dass der Fahrer

- stets das Fahrzeug kontrolliert,
- das System übersteuern kann und
- keine unerwünschten oder gar schreckhaften Reaktionen zeigt.

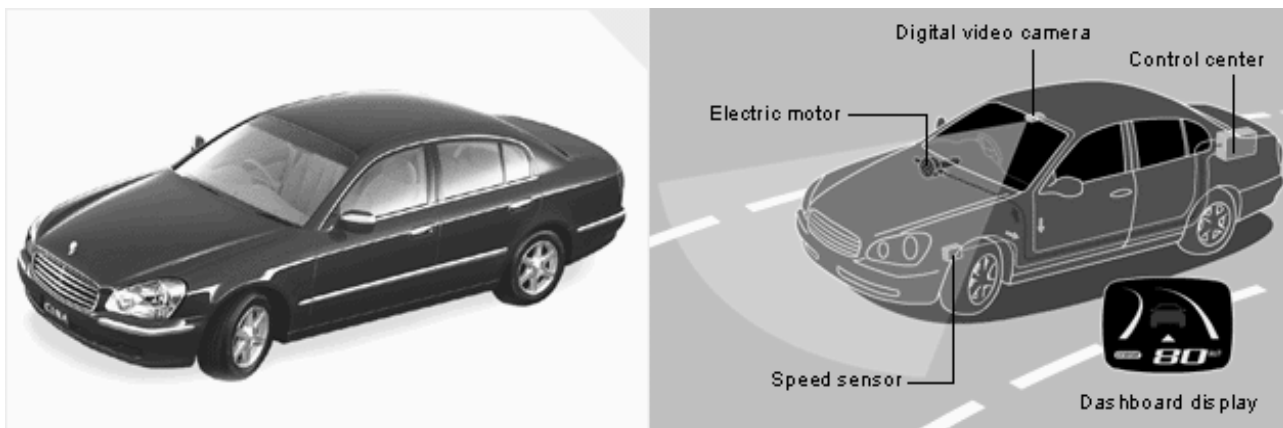


Abbildung 2-3: Nissan Cima LKS (aus <http://www.nissan.co.jp>)

Anzumerken ist, dass die Eingriffe des Systems auf die Fahrzeugbewegung einwirken und damit dem Fahrer damit neue Informationen zur Verfügung stellen. Eingreifende und handlungsersetzende Systeme stellen damit gleichzeitig haptisch-kinästhetische Informationssysteme dar [BK02].

Teilautonome Systeme

Noch umfassender ist der Eingriff bei teilautonomen handlungsersetzenden Systemen: Ein teilautonomes System übernimmt einen Ausschnitt (z.B. Geschwindigkeitsbereich) innerhalb einer Funktion vollständig und führt innerhalb dieses Ausschnitts alle Aktionen ohne Beteiligung des Fahrers durch (z.B. Adaptive Cruise Control). Aufgabe des Fahrers ist nicht mehr die Regelung selbst, sondern lediglich die Überwachung der Systemfunktion. Der Fahrer kann durch eigene Aktionen das System übersteuern, deaktivieren oder beeinflussen. Er muss beständig überwachen, ob sich das System innerhalb seiner Systemgrenzen befindet, um, falls notwendig, die Handlungsausführung zu übernehmen. Umsetzungen im Bereich der Querspurführungsunterstützung existieren nicht im Markt.

Vollautonome Systeme

Die höchste Stufe der Automation stellen vollautonome handlungsersetzende Systeme dar. Diese Systeme sind innerhalb ihrer Funktion nicht begrenzt und übernehmen vollständig die Steuerung des Fahrzeugs. Der Fahrer ist vollständig aus dem Regelkreis entfernt ("out of the loop"). Eine derartige vollständige Übernahme der Querführung als Teil eines vollautonomen Systems konnte in einigen Forschungsvorhaben bereits gezeigt werden. So ist beispielsweise ein Team der Bundeswehr Universität München Anfang der 1990er Jahre mit einem Forschungsfahrzeug weitgehend autonom längs- und quergeführt von München nach Hamburg gefahren [MAU00]. In den USA beschäftigte sich zur gleichen Zeit eine Gruppe der Carnegie Mellon University mit autonomer Querführung und fuhr 98% einer Strecke von ca. 3800 Meilen „no hands across America“ [PJ96]. Auch bei Daimler Benz und Volkswagen wurden solche Vorhaben in den 1990er Jahren verfolgt. Weitere gegenwärtige Beispiele sind die DARPA Wettbewerbe Grand Challenge 2004 und 2005 sowie die Urban Challenge 2007, auf denen Fahrzeuge vollständig autonom bestimmte Fahraufgaben zu bewältigen hatten. Auch wenn die große Zahl an ausgefallenen Fahrzeugen dort deutlich macht, wie weit der Weg bis zum autonomen Fahren noch ist, geben diese Vorhaben dennoch einen beeindruckenden Ausblick auf Möglichkeiten in der Zukunft. Denkbar ist insbesondere in wenig komplexen, gut vorhersehbaren Situationen eine automatisierte Spurführung zu erlauben, z.B. bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten auf Autobahnen im zähfließenden Verkehr. Bis zu einer Serien-einführung sind aber noch eine Vielzahl von Fragen zu beantworten.

Bei den gegenwärtigen Umsetzungen von Querführungsunterstützung handelt es sich in der Regel um Warnsysteme oder handlungsunterstützende Assistenzsysteme. Umsetzungen mit höherem oder geringerem Automatisierungsgrad existieren aufgrund von Einschränkungen der technischen Leistungsfähigkeit bzw. geringem Nutzwert bis dato nicht. Die weiteren Betrachtungen des Systemaufbaus konzentrieren sich deshalb auf Warn- und eingreifende Assistenzsysteme.

2.1.2 Systemaufbau und Komponenten

Dieses Kapitel beschreibt die zum Aufbau eines Spurführungssystems erforderlichen Komponenten (Abbildung 2-4) und stellt unterschiedliche Ausstattungsvarianten von Sensorik, Regelstrategien und der Signalgestaltung vor. Dabei beschränkt sich diese Arbeit auf die Beschreibung der prinzipiellen Funktionsweise und der Vermittlung der Informationen des Systemeingriffs an den Fahrer. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf die genannten Quellen verwiesen.

Sensorik: Kamerasysteme und alternative Konzepte

Zur Unterstützung bei der Spurhaltung muss das System Informationen über die Umwelt und die Position des Fahrzeugs innerhalb dieser Umgebung erfassen. In der vorliegenden Literatur werden Spurmarkierungen in der Regel über Kameras mit integrierter Bildverarbeitung gewonnen [Enk01; Lee02]. Dabei ist zu beobachten, dass die in früheren Systemen verwendeten CCD Kameras zunehmend durch CMOS Kameras mit vergleichsweise höherer Dynamik ersetzt werden. Gegenwärtige Forschungssysteme arbeiten zum Teil auch mit aktiven Kamerasystemen, die eine pixelgenaue Abstandsbestimmung vornehmen (Abbildung 2-5). Mit diesen Verfahren ist es möglich, die Fahrspurbegrenzungslinien auf bis zu 80 m Entfernung

über eine spezielle Art der Kontrastanalyse zu bestimmen [YHI+96; LJV+96] und neben der Positionsbestimmung auch Informationen über den Straßenverlauf zu gewinnen. Als problematisch sind verschiedene Straßenbeläge, unvollständige oder sogar mehrdeutige Markierungen (z.B. in Baustellen) sowie Blendung durch Sonneneinstrahlung und einige Witterungs- und Wetterverhältnisse (z.B. Schnee, Nebel) anzusehen. Zur Überbrückung nicht zu vermeinder Lücken in der Fahrspurerkennung werden für gewöhnlich Kalman-Filter eingesetzt (für eine Übersicht: [FSS02; LGL95; Wen00]). Weiterhin kann die Position des Autos relativ zur Fahrspur bestimmt werden. Mit Hilfe fahrzeuginterner Daten (Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit, Lenkradwinkel) kann der weitere Verlauf der Fahrzeugbewegung vorausgerechnet werden. Dies ermöglicht die Regelung der Querführung beispielsweise auf die Spurmitte.

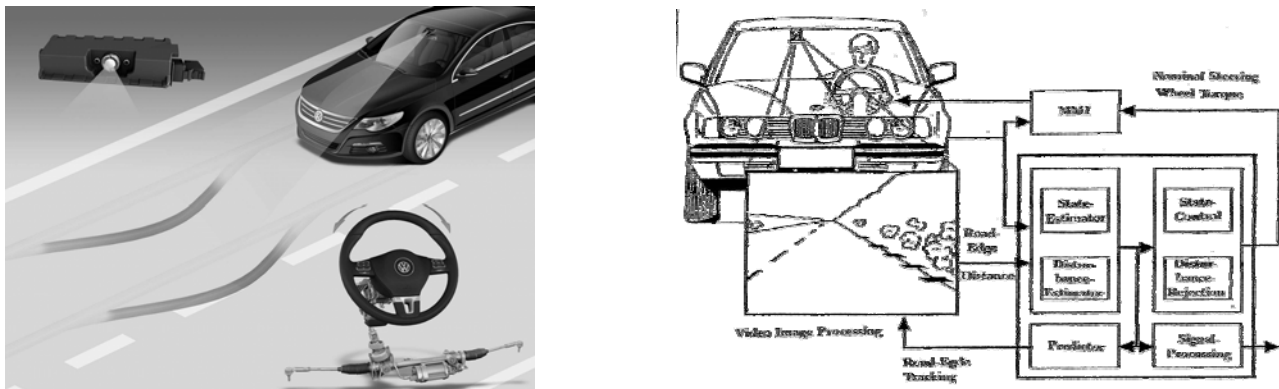


Abbildung 2-4: Komponenten eines Spurführungssystems und beispielhafter Aufbau, rechts aus [Naa92].

Alternativ wurden sowohl in den USA im Rahmen des PATH Programms³ [SDH+91; CZW+92] als auch innerhalb des Projektes für eine vollständige Automation des Fahrens auf Autobahnen „Intelligent Highway System“ (IHS) in China [CZC+02] Systeme zur Querführung entwickelt, die die Informationen über den Straßenverlauf und die Positionsbestimmung des Fahrzeugs über magnetische Nägel in der Asphaltdecke gewinnen (Abbildung 2-6). Der Vorteil eines solchen Systems gegenüber optischen liegt auf der Hand: Auch bei schlechten Sichtbedingungen, nicht einsehbaren Kurven oder sogar schneebedeckter Straße erhält das Querführungssystem zuverlässige Angaben über den Straßenverlauf. Eine flächendeckende Ausrüstung des Straßennetzes mit Magnetenägeln bedeutet allerdings gleichzeitig hohe Kosten und einen beträchtlichen baulichen Aufwand.



Abbildung 2-5: CMOS Kameramodul der Firma ADC (links) und Screenshot des Spurtrackers nach Bildverarbeitung [Rei07, S.11].

³ PATH: Partners for Advanced Transit and Highways

Weiterhin existieren Ansätze, den Fahrbahnverlauf sowie die Position des Fahrzeugs in der Fahrbahn mit Hilfe von digitalen Karten und GPS-Systemen zu erfassen. Aufgrund der derzeit ungenügenden Genauigkeit erscheint eine Umsetzung dieses Konzeptes nicht wahrscheinlich [Bus03, S. 58].

Eine letzte Möglichkeit der Spurerkennung ergibt sich aus der Verwendung von Infrarotsystemen, bei denen die Reflektion von ausgesendetem Infrarotlicht gemessen wird. Dieser Aufbau wird beispielsweise beim Citroen AFIL verfolgt (Abbildung 2-2). Auch hier ergeben sich Einschränkungen in der Systemverfügbarkeit. Zudem erlauben die Infrarotsensoren nur eine Positionsbestimmung auf Höhe des Fahrzeugs. Damit ist keine Vorausschau über den kommenden Straßenverlauf möglich.

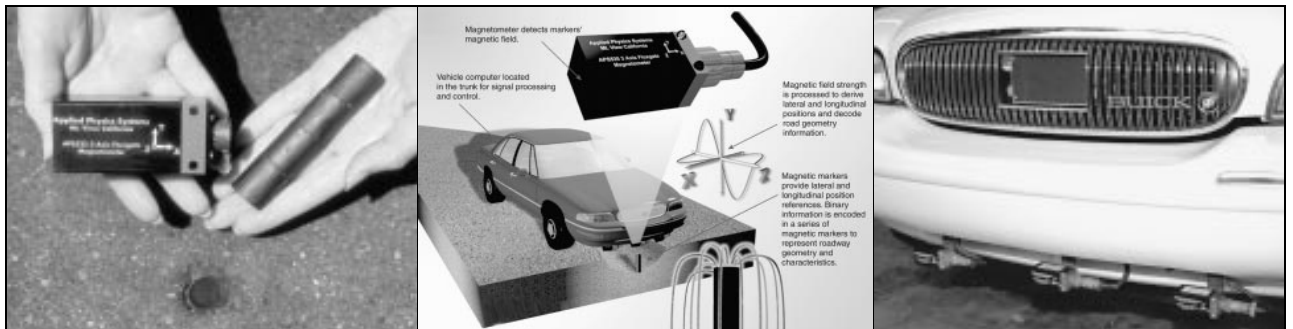


Abbildung 2-6: Darstellung des Magnetnagelverfahrens (mitte): In die Fahrbahn einzubringende Magneten (links) und Anordnung der Magnetometer an der Vorderseite des Fahrzeugs (rechts) [ZST98, S.8f].

Algorithmen zur Spurverlassensberechnung

Aus den gelieferten Sensorsignalen berechnet der Systemalgorithmus eines Spurhaltesystems die Ausgabe einer Warnung oder eines Eingriffs. Diese Berechnung kann über unterschiedliche Ansätze erfolgen. Zu nennen sind beispielsweise Regelungsstrategien auf Grundlage der Querposition des Fahrzeugs oder der Abweichung von der Spurmitte in einem Vorausschau-punkt (Aim Point Error) [z.B. KBK00; YHI+96]. Auch wenn Qualität einer Trajektorienberechnung durch die Vorausschau erhöht wird, neigen beide Ansätze zum Kurvenschneiden.

Um Randwarnungs- oder Spurführungsassistenzsysteme anzusteuern, wird häufig die Time to Line Crossing (TLC) herangezogen. Dieser Parameter gibt die bei aktueller Trajektorie relativ zum Fahrbahnverlauf noch verbleibende Zeit bis zum Überfahren der Fahrspurlinien an. Entwickelt wurde dieser Parameter zur Beschreibung der Güte des menschlichen Querregelverhaltens [GMB84]. In die Berechnung gehen neben der Längs- und Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs und der Position und Ausrichtung in der Spur auch Querbewegung, Spurkrümmung und der aktuelle Lenkwinkel zur Vorhersage der Fahrzeugtrajektorie ein [VBD00]. Abbildung 2-7 stellt die Berechnung der Distance to Line Crossing (DLC), aus der über die Fahrzeuggeschwindigkeit die TLC berechnet wird, schematisch dar. Der Vorteil der TLC besteht in der Berechnung des kritischen Zeitwerts, so dass dem Fahrer unabhängig von der Geschwindigkeit stets die gleiche Zeit zur Ausregelung einer drohenden Spurverletzung eingeräumt wird.

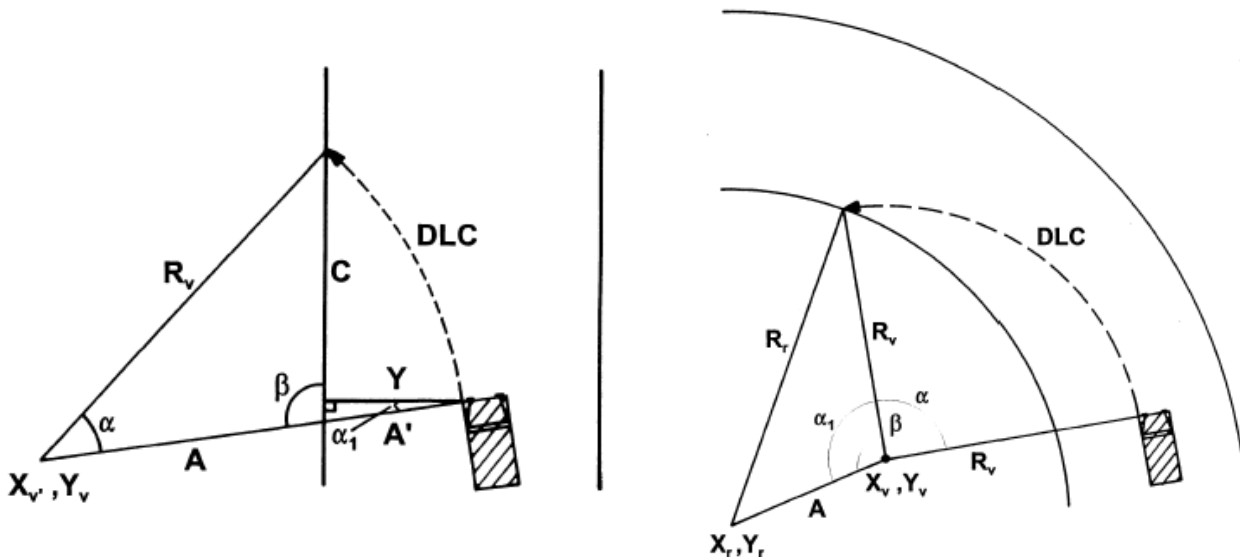


Abbildung 2-7: Berechnung Distance to Line Crossing auf gerader Strecke (links) und bei gekrümmter Fahrspur (rechts) nach [VBD00].

Ein weiteres Konzept ist der auf Fuzzy Logic basierende Virtual Rumble Strip (VRBS) [PG03]. Dieser Algorithmus benötigt geringere Rechenleistung als die TLC Berechnung und eine setzt keine aufwändige Sensorik zur Analyse des Spurverlaufs voraus. Mit Hilfe der erfassten Daten (Entfernung zum Fahrspurrand y und dem Quadrat der lateralen Geschwindigkeit y'^2) erweitert oder verengt das System die Schwelle des Systemeingriffs. Abbildung 2-8 zeigt die resultierende Veränderung des Bereichs ohne Systemeingriff in Abhängigkeit von Querposition und lateraler Geschwindigkeit.

Die Methode der Future Offset Distance [Bat99] stellt im Prinzip eine Kombination der TLC Methode mit der dynamischen Schwellenanpassung aus der VRBS Regelung dar. Weiter existiert ein Potential Field Ansatz vor [RSG04], der für die Anwendung in einem Steer-by-Wire-Fahrzeug entwickelt wurde. Das Potential Field ist eine Funktion des Aim Point Errors und einem Verstärkungsfaktor k zur Anpassung des Potentialfeldes (Abbildung 2-9).

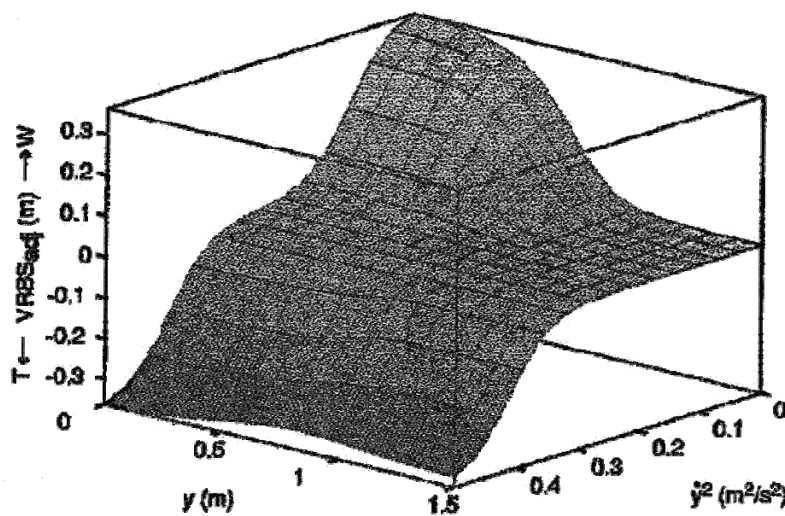


Abbildung 2-8: Fuzzy Anpassung des VRBS abhängig von y und y'^2 [PG03].

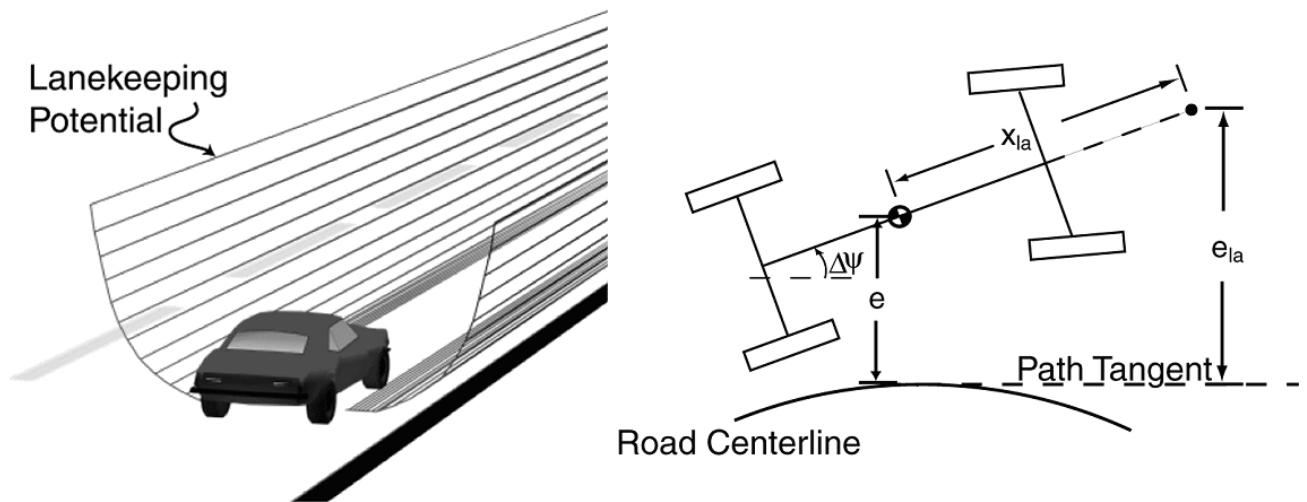


Abbildung 2-9: Darstellung der Potential Field Funktion und Beschreibung der Modellgrößen Vorausschau x_{la} , Gierwinkelfehler $\Delta\psi$, aktuelle und vorhergesagte Querabweichung von der Spurmitte e bzw. e_{la} [STS+08].

$$V(e_{la}) = k(e_{la})^2 = k(e + x_{la} \sin \Delta\psi)^2 \quad (2.1)$$

Die fünf zuvor skizzierten Algorithmen zur Auslösung einer Spurverlassenswarnung mit oder ohne aktiven Eingriff in die Querführung stellen zum Teil sehr unterschiedliche Anforderungen an die Sensorik und berücksichtigen verschiedene Umgebungs- und Fahrzeugparameter. Zu unterscheiden sind hinsichtlich der Erfassung des Straßenverlaufs die Algorithmen, die keine Vorausschau erlauben, die Methode der Querabweichung und das VRBS, von den Ansätzen Aim Point Error, Time-to-Line-Crossing und Potential Field, die den Straßenverlauf in einem Vorausschaupunkt vor dem Fahrzeug mit einbeziehen.

Aktorik: Möglichkeiten des Eingriffs in die Fahrzeugführung

Bei Systemen, die den Fahrer nicht nur informieren oder warnen, sondern handlungsunterstützend in die Fahrzeugführung eingreifen, müssen die Vorgaben aus dem Spurführungsalgorithmus über fahrzeugseitige Aktorik umgesetzt werden. Eine Beeinflussung des Gierwinkels des Fahrzeugs und damit der relativen Querposition auf der Fahrbahn ist sowohl über Lenkeingriffe (in der Regel an der Vorderachse) als auch über gezieltes Abbremsen oder Beschleunigen einzelner Räder möglich. Letzteres ist im Fahrzeug beispielsweise über Bremsingriffe des Elektronischen Stabilisierungs-Programms (ESP) oder aber Torque Vectoring Systeme möglich.

In der Regel erfolgt der Eingriff über die Lenkung des Fahrzeugs. Die zunehmende Verbreitung von elektromechanischen Lenksystemen (EPS) (Abbildung 2-10) ermöglicht eine einfache und kostengünstige Umsetzung einer Querführungsassistentenfunktion über die Ansteuerung des Servomotors [HSF06]. In der Regel wird parallel zur Lenkkraftunterstützung ein gerichtetes Zusatzlenkmoment aufgeschaltet. Sofern der Fahrer diesem Lenkmoment, das er als Kraft im Lenkrad spürt, nicht entgegenwirkt, führt dieses Zusatzmoment zum Einschlagen der Räder und damit zur Veränderung der Fahrzeugtrajektorie. Lediglich bei Steer-by-wire [RSG04] oder Überlagerunglenkungen [LK05] ist eine Gestaltung der Rückmeldung am Lenkrad unabhängig von den Rädern möglich. Für den Fall, dass im Fahrzeug keine elektromechanische Servolenkung verbaut ist, können Zusatzmomente auch über einen an Lenksäule oder Zahnstange zusätzlich angebrachten Motor aufgeschaltet werden [z.B. LC95; Naa92].

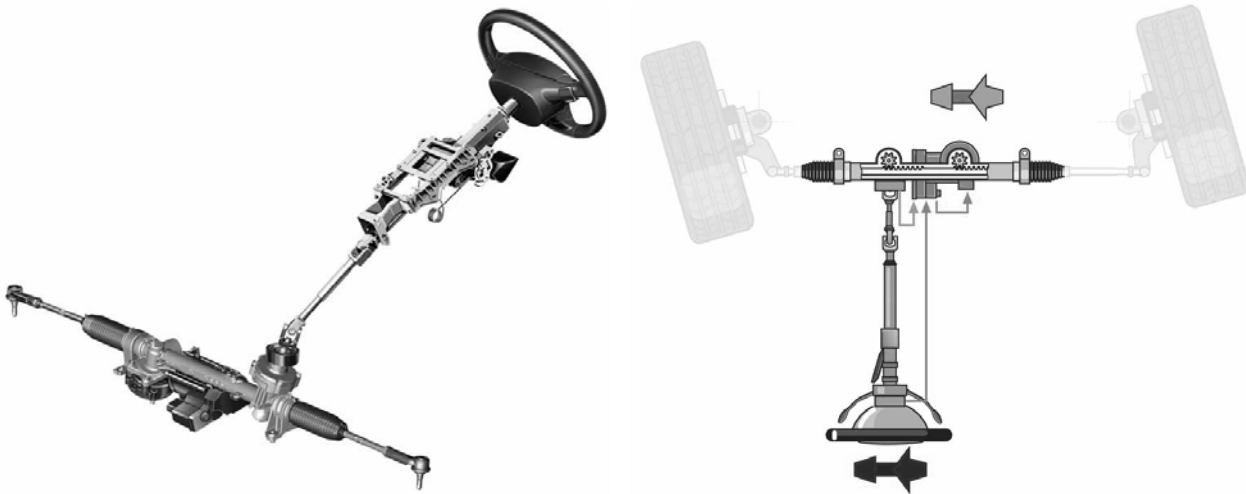


Abbildung 2-10: Aufbau einer elektromechanischen Servolenkung EPS [VW07]

HMI: Design der Interaktion zwischen Fahrer und System

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die einzelnen Schritte des Prozesses von der Aufnahme der Umgebungsinformation bis zum Systemeingriffs beschrieben wurden, beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit der Vermittlung der vom System aufgenommenen Informationen und der Rückmeldung der Systemaktivität an den Fahrer. Es besteht die Möglichkeit, den Fahrer visuell, akustisch, haptisch oder auch kinästhetisch zu informieren.

So ist eine Spurverlassenswarnung in Form einer Leuchtanzeige denkbar. Da davon auszugehen ist, dass ein visuelles Signal den Fahrer nicht schneller oder besser informiert als seine eigentliche Sicht, ist eine solche Systemgestaltung nicht als sinnvoll zu erachten. Daneben ist der visuelle Kanal der beim Autofahren am stärksten beanspruchte Kanal. Im Sinne des Modells multipler Ressourcen [WIC83] sollte der visuelle Kanal nicht weiter belastet werden, wenn die Möglichkeit besteht, dass für die Verarbeitung der zusätzlichen Information keine weiteren perzeptiven oder kognitiven Ressourcen zur Verfügung stehen (Abbildung 2-11). Sinnvoller ist es in diesem Zusammenhang eine andere Modalität zu nutzen, da davon auszugehen ist, dass diese beim Fahren weniger stark belastet ist und ausreichend Verarbeitungskapazität zur Verfügung steht.

Zur Warnung vor einem Verlassen der Fahrspur wird in vielen Fällen ein akustisches Feedback verwendet. In der Regel wird als Signal das Geräusch simuliert, das ertönt, wenn man mit den Reifen über eine Spurbegrenzung in einem Baustellenbereich fährt. Dieses „Nagelbandrattern“ wird über das Audio-System als akustisches Signal eingespielt [s.a. Bat99; SGH92]. Das akustische Signal wird zumeist ausgegeben, indem es nur auf der Seite eingespielt wird, auf der das Spurverlassen droht. Neben diesem „Nagelbandrattern“ werden auch Warntöne eingesetzt. Als Beispiel ist hier ein von [SJ03] realisierter Warnton zu nennen. Dieser Ton besteht aus einer Kombination einer 500Hz und einer 1kHz Schwingung. Denkbar ist die Integration von Informationen über die Stärke der Abweichung oder die Dringlichkeit des Eingriffs über Modulation des Audiosignals. Ein Nachteil der akustischen Warnung ist, dass nicht nur der Fahrer, sondern auch der Beifahrer die Warnung bemerkt. Dies führt zu einer möglichen Bloßstellung des Fahrers und schlägt sich in einer geringen Akzeptanz bei Pkw-Fahrern nieder [Bus03]. Trotz der Umsetzung in Lastkraftwagen ist ein solches Systemdesign für den Pkw-Verkehr daher nicht uneingeschränkt zu empfehlen.

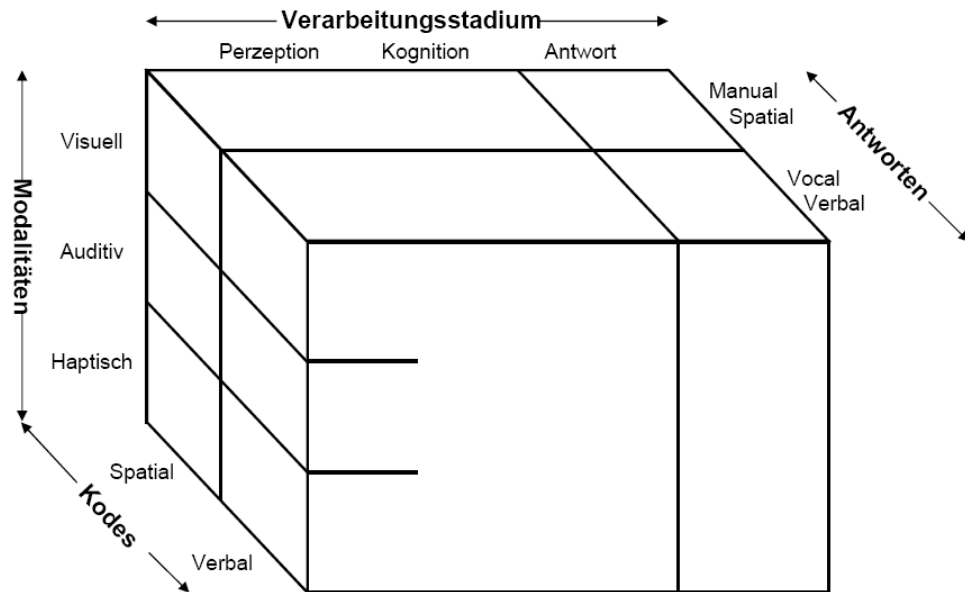


Abbildung 2-11: Modell multipler Ressourcen, erweitert nach [Wic84].

Neben visueller und akustischer Rückmeldung besteht die Möglichkeit, den Fahrer über haptische Signale zu informieren. Dies geschieht in der Regel über Bewegungen im Lenkrad, die als Vibrationen durch Unwuchtmotoren in der Lenkradspeiche oder als gerichtete Kräfte über eine elektrische Servolenkung (EPS) [z.B. ITK+00] erzeugt werden können. Interessant erscheint die haptische Warnung vor allem aufgrund der schnellen Reaktionsleistung des Menschen auf derartige Signale. Als Grund hierfür können Befunde zur Reiz-Reaktions-Kompatibilität angeführt werden [FS53; Str93; LP95]. So zeigt sich, dass bei zunehmender Kompatibilität von Stimulus und Reaktion in Modalität, Kode und Antwort [Wic84] die Reaktionszeit abnimmt (Abbildung 2-11). In diesem Fall verbleibt die Informationsverarbeitung über alle Verarbeitungsstadien innerhalb einer Subressource und muss nicht zwischen den Ressourcen wechseln. Die Wechsel sind als kognitiv aufwändiger anzusehen. Anschaulich und in Bezug auf Spurführungssysteme bedeutet dies: Wenn der Fahrer möglichst schnell zu einer Lenkkorrektur aufgefordert werden soll (manual spatial), so sollte die Information an den Fahrer räumlich kodiert sein (spatial) und über die Hände (haptic) vermittelt werden. Neben diesem Vorteil haptischer Signale gegenüber anderen Modalitäten kann weiter innerhalb der unterschiedlichen Darbietungsformen differenziert werden. Während eine Vibrationswarnung den Fahrer lediglich darüber informiert, dass ein Lenkeingriff zur Vermeidung eines Spurverlassens auszuführen ist, bieten die gerichteten Eingriffe zusätzliche Information zur Richtung des erforderlichen Korrekturingriffs.

Über die optimale Gestaltung solcher gerichteten haptischen Signale im Lenkrad gibt es keine fundierten Kenntnisse. Aus den bisherigen Umsetzungen sind maximale zusätzliche Lenkmomente von bis zu 3Nm bekannt. Dieses Signal kann kontinuierlich und mit zunehmender Abweichung ansteigend, oder als diskreter Puls bei Überschreitung eines Schwellenwerts der Abweichung dargeboten werden. Die Zusatzlenkmomente können beispielsweise mit einer Vibration kombiniert und damit durch ein zusätzliches Warnsignal ergänzt werden. In manchen Systemen werden akustische Warnung und haptische Unterstützung kombiniert als multimodales Feedback [Pai71; Pai86] eingesetzt, wie z.B. bei Nissan Cima oder Mitsubishi Proudia.

2.1.3 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass Querführungsassistenten vollkommen unterschiedlich ausgelegt werden kann. Im Hinblick auf die am Markt und in Entwicklung befindlichen Systeme muss zwischen warnenden und handlungsunterstützenden Systemansätzen unterschieden werden. Die Systeme basieren in der Regel auf ähnlichen Strategien, wobei ein eingreifendes System höhere Anforderungen an Algorithmik und Aktorik stellt als ein ausschließlich warnendes System: Der Algorithmus muss neben dem Spurverlassenskriterium zusätzlich Stärke und Verlauf eines Eingriffes berechnen und eine geeignete Aktorik ansprechen.

Als zentral im Rahmen dieser Arbeit wird die Art und Weise der Informationsvermittlung an den Fahrer angesehen. Es ist dargestellt worden, dass der Fahrer zur Querführungsunterstützung visuell, haptisch und akustisch gewarnt werden kann. Ein herkömmliches visuelles Feedback ist als nicht geeignet einzustufen. Neben akustischen Warnungen unterschiedlicher Art aus Richtung des Spurverlassens sind Sitz- oder Lenkradvibrationen als haptische Warnsignale, gerichtete Zusatzlenkmomente als haptisches Feedback eines Eingriffs in die Spurführung des Fahrzeugs und alle möglichen Kombinationen dieser Signale denkbar. Dabei wird deutlich, dass ein Eingriff in die Fahrzeugführung über eine EPS-Lenkung des Fahrzeugs zur Spurführungsassistenten, immer mit einem haptischen Feedback einhergeht.

Ungeklärt ist bislang, welche Systemumsetzung am besten geeignet ist, den Fahrer zu unterstützen. Damit einhergehend gilt es zu beleuchten, über welchen Kanal die Systemzustände und -eingriffe am besten an den Fahrer rückgemeldet werden können und wie ein entsprechendes Signal gestaltet werden sollte. Daher wird im nächsten Teilkapitel auf diese Fragen eingegangen und der Stand der Forschung zur optimalen Gestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle zur Spurführungsassistenten dargestellt.

2.2 Empirische Studien zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Spurführungssystemen

Aus dem vorangehenden Abschnitt ist deutlich geworden, dass zur Ausgestaltung eines Spurführungssystems insbesondere Erkenntnisse über unterschiedliche Arten der Informationsvermittlung an den Fahrer vonnöten sind. Die Art und Weise, mit der der Fahrer über den Systemstatus in Kenntnis gesetzt werden kann, ist dabei stark mit der Funktionsweise des Systems verknüpft. So ist für ein Warnsystem eine Reihe von Signalen denkbar. Neben einer akustischen Warnung kommen beispielsweise ungerichtete haptische Signale in Form von Lenkrad- oder Sitzvibrationen in Frage. Dagegen stellen eingreifende Spurhalteassistenten schon aufgrund des technischen Aufbaus in der Regel einen Lenkeingriff über Zusatzlenkmomente als gerichtetes haptisches Signal dar. Es gilt zu klären, welche Signalform für eine Unterstützung des Fahrers am besten geeignet ist. Daher sind die unterschiedlichen Signalmodalitäten hinsichtlich ihrer Eignung zur Vermittlung von Warnungen und Systemeingriffen zu vergleichen.

Im Besonderen bleibt zu klären, ob mit Hilfe gerichteter haptischer Signale der Fahrer über den Systemeingriff informiert und gleichzeitig aktiv unterstützt werden kann. Ein zentraler Aspekt erscheint somit die Ausgestaltung eines gerichteten haptischen Signals. Zur Bestim-

mung geeigneter Unterstützungsmomente sind Erkenntnisse über Stärke und Form der einzusetzenden Signale zu liefern. Neben der Art und Form des Signals sind weiterhin belegbare Aussagen über die optimale Gestaltung der Regelcharakteristik zu gewinnen, da die Regelstrategie die Rückmeldung an den Fahrer direkt beeinflusst. Aus dem Vergleich unterschiedlicher Regelungen, die auf verschiedenen Parametern basieren, werden Vor- und Nachteile unterschiedlicher Regelstrategien hinsichtlich der Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion abgeleitet. Weiter werden Aspekte der Adaption und Individualisierung betrachtet. Es soll dargestellt werden, ob und in welchem Ausmaß die Akzeptanz und die Fahrleistung durch die Anpassung des Systems an den einzelnen Fahrer oder Fahrertyp verbessert werden kann. Daneben bleibt zu beantworten, ob eine Berücksichtigung situativer Gegebenheiten zur Anpassung sinnvoll oder gar notwendig ist. Die betrachteten Untersuchungen werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst dargestellt.

2.2.1 Vorteile der Assistenz durch Spurführungssysteme

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der aufgeführten Studien hinsichtlich der Unterschiede zwischen manueller und durch ein Spurführungssystem unterstützter Fahrzeugführung dargestellt. Bezüglich der Querregelung lässt sich festhalten, dass die Regelungsgüte durch ein Spurführungssystem nicht verschlechtert wird [BK02; VGT+96; ITK+00; Mar01c; MEH96; YS97; YS99]. Vielmehr berichten die Studien, die ein eingesetztes System zur manuellen Regelung in Bezug setzen, von Vorteilen für mindestens eine der betrachteten Systemvarianten. Die Idealspur wird verbessert [BK02; Mar01a], konstanter eingehalten [VGT+96; Mar01c; MEH96; YS97] und die mittlere TLC vergrößert sich durch den Einsatz eines Spurführungssystems [VGT+96].

Diesen Verbesserungen in der Spurführung stehen kontroverse Befunde bezüglich des Regelungsaufwands für den Fahrer entgegen. Während [VGT+96] durch den Einsatz eines Querregelungssystems eine Verringerung hochfrequenter Lenkbewegungen beobachten, kommt [Mar01c] zu umgekehrtem Ergebnis. In dieser Untersuchung zeigt sich eine Zunahme der Lenkrichtungswechselrate und der mittleren Lenkgeschwindigkeit. Allerdings wird das von [Mar01c] eingesetzte Spurführungssystem als deutlich schlechter im Vergleich zur konventionellen Spurführung bewertet. Daher liegt die Vermutung nahe, dass es sich in diesem Fall um ein nicht nutzergerecht gestaltetes System handelt. Die Annahme, dass neben der Güte auch der Aufwand der Regelung für den Fahrer mit Hilfe eines Spurführungssystems vermindert werden kann, wird durch Ergebnisse von [MEH96] weiter untermauert: Hier berichten 90% der Probanden von der Verringerung der zu leistenden Lenkarbeit. 80% der untersuchten Personen ziehen das Fahren mit Systemunterstützung dem konventionellen vor.

Neben der Möglichkeit der Unterstützung des Fahrers bei der Bewältigung der Fahraufgabe zeigen die aufgeführten Studien eine physische und psychische Entlastung des Fahrers in Form geringerer zu bewältigender Lenkmomente und einer Erweiterung des Blickfeldes bei Systemunterstützung [ITK+00] (Abbildung 2-12). Der Fahrer kann seinen Blick länger von der Fahrbahn abwenden [BK02; VGT+96; YS99] und zeigt bei verbesserter Fahrleistung eine Steigerung der Leistung in einer zu bearbeitenden Nebenaufgabe [BK02; YS99]. Die in beiden Systemen dargebotenen haptischen oder akustischen Informationen können demnach vom Fahrer für die Spurführung verwendet werden und ermöglichen eine Verringerung der

visuellen Beanspruchung. Mit führender (eingreifender) Spurführungsunterstützung erlebt der Fahrer die Fahraufgabe durch diese Verlagerung als weniger beanspruchend.

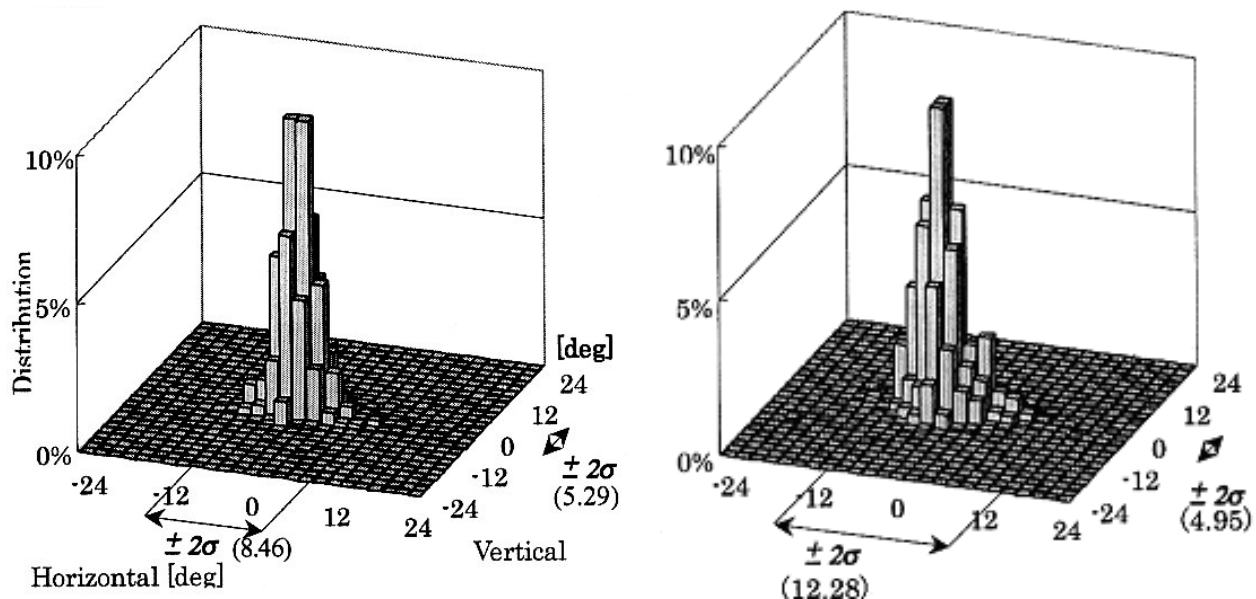


Abbildung 2-12: Augenbewegungswinkel bei Systemunterstützung 20% (links) und 100% (rechts) [ITK+00].

Durch den Einsatz eines Querregelungssystems ist also möglich, die Fahrleistung zu verbessern und den Fahrer gleichzeitig von seiner Tätigkeit zu entlasten, ohne ihn dabei gänzlich von der Fahrzeugquerführung zu entbinden. Insbesondere im Hinblick auf sicherheitsrelevante Parameter, wie die Anzahl der Spurverletzungen und die TLC, sind diese Vorteile der Unterstützung der Querführung als wesentlich anzusehen. Interessant bleibt weiterhin der kontroverse Befund von [Mar01c]. Er ist als Hinweis für die Wichtigkeit der Art der Umsetzung eines Spurführungssystems zu verstehen und wird in Kapitel 2.3 aufgegriffen und diskutiert.

2.2.2 Modalität der Warnung und des Eingriffs

Dieser Abschnitt fasst die Befunde aus der Literatur zu unterschiedlichen Warnmodalitäten zusammen. Verglichen werden an dieser Stelle akustische Warnsignale mit haptischen Informationen im Lenkrad, die durch Vibration oder gerichtete Lenkmomente an den Fahrer vermittelt werden. Zwar beschreibt eine Untersuchung, die im Fahrsimulator ohne Bewegungssystem durchgeführt wurde, ein schlechteres Abschneiden des gerichteten haptischen Systems bezüglich der Variabilität der Querabweichung [SGF+93]. Andererseits belegen eine Vielzahl von Studien im Fahrsimulator [SGK+98; MP04; EFN+08] sowie eine Realfahrzeugstudie [Mar01c] die Vorteile eines gerichteten haptischen Eingriffs bezüglich der Reaktionszeit und der maximalen Querabweichung (Abbildung 2-13).

Gleichzeitig verringert sich bei haptischem Motor Priming⁴ gegenüber einer akustischen Warnung oder einer Sitz- oder Lenkradvibration die Dauer eines Spurverlassensereignisses [EFN+08] (Abbildung 2-14). Fraglich bleibt, ob die kontroversen Ergebnisse bezüglich hapti-

⁴ Motor Priming bezeichnet nach [ELJ08] eine Überlagerung einer Lenkradvibration mit einem gerichteten Zusatzmoment. Damit wird der Fahrer gleichzeitig über ein bevorstehendes Spurverlassen informiert und bekommt über das gerichtete Lenkmoment über die Richtungsinformation eine Handlungsempfehlung. Ein gerichtetes Lenkmoment ohne überlagertes Lenkmoment wird dort nicht untersucht.

scher Signale auf der unterschiedlichen Ausgestaltung der jeweiligen Signale beruhen oder aber im Wesentlichen durch die Untersuchungssituation erklärbar sind.

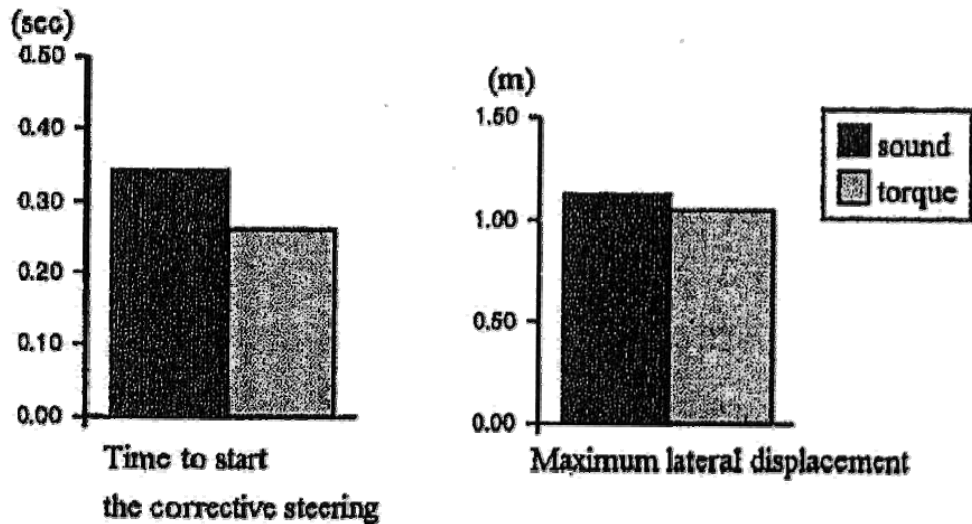


Abbildung 2-13: Vergleich der Reaktionszeit (links) und der maximalen Querabweichung (rechts) bei haptischer (torque) gegenüber akustischer Warnung (sound) [SGK*98].

Besonderes interessant erscheinen in diesem Zusammenhang die Ergebnisse von [SJ03]: Beim Erstkontakt mit dem Signal zur Spurverlassenswarnung erweist sich das gerichtete haptische Signal "Pulse like steering torque"⁵ einem akustischen gegenüber hinsichtlich Reaktionszeit und Querablage als überlegen. (Abbildung 2-15) Die genauere Analyse der Reaktionen auf das gerichtete haptische Signal weist jedoch auf die Wichtigkeit der angemessenen Ausgestaltung eines solchen haptischen Signals hin. Nur 50% der Probanden können das gerichtete Signal richtig interpretieren und angemessen reagieren. Die Reaktionszeit und die Spurführung sind in diesem Fall jedoch weit besser als bei allen anderen untersuchten Signalen (Abbildung 2-16).

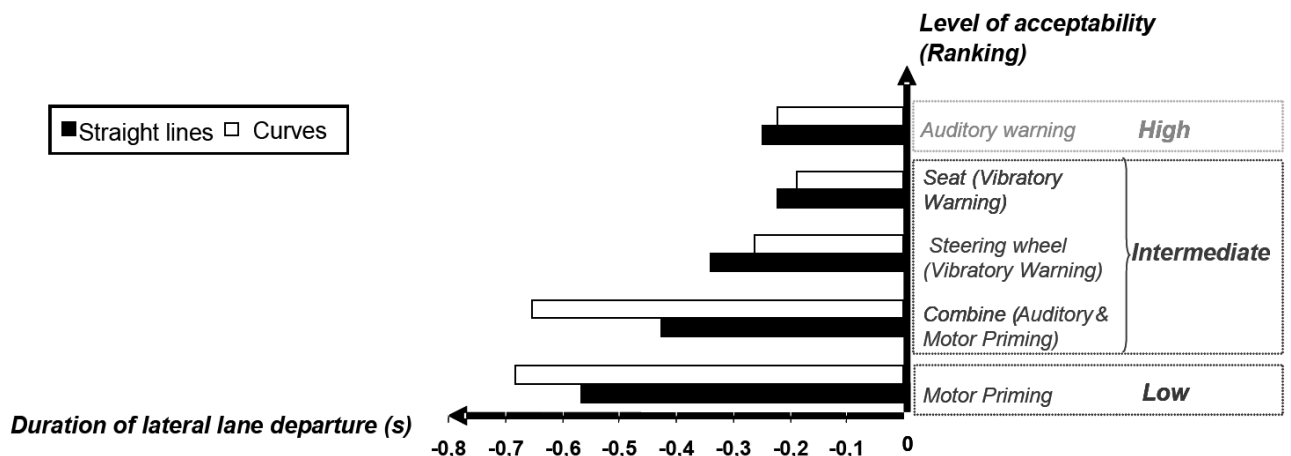


Abbildung 2-14: Verringerung der Dauer der Spurabweichungen als Differenz zur Referenz ohne Spurführungsassistenz bei unterschiedlichen Warnkonzepten (links) und die bewertete Akzeptanz [EFN*08].

⁵ Beim pulsierenden Lenkmoment ("Pulse-like steering torque") nach [SUZ03] wird eine Lenkradvibration und ein gerichtetes Zusatzmoment überlagert dargestellt.

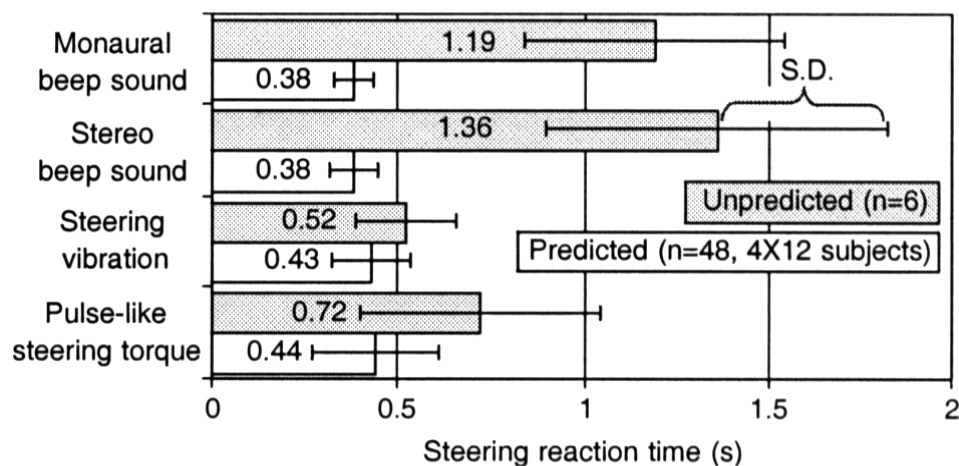


Abbildung 2-15: Vergleich der Reaktionszeiten zwischen verschiedenen Signalen bei Erstkontakt ("Unpredicted") und weiteren Signalanbietungen ("Predicted") [SJ03].

Allerdings reagiert die andere Hälfte der untersuchten Personen mit einer Lenkbewegung in die falsche Richtung, weil sie das gerichtete Signal auf eine Störung der Fahrbahn zurückführen, die es zu kompensieren gilt. Eine hohe Abweichung von der Idealspur ist die Folge. Damit zeigt die Studie eindrucksvoll, wie die Vorteile haptischer Information durch ein missverständlich zu interpretierendes Signal teilweise ins Gegenteil umgekehrt werden. Aufgrund der Heterogenität und der teilweise unzureichenden Beschreibung der Signalcharakteristik lassen sich aus den vorliegenden Studien keine Gestaltungsempfehlungen ableiten. Doch aufgrund der Ergebnisse von [SJ03] und [SGF+93] ist von einem pulsierenden Rechtecksignal abzuraten. Hier sind unangemessene Reaktionen zu beobachten.

Die berichtete höhere Akzeptanz von handlungsunterstützenden haptischen Systemen mit gerichteten Signalen gegenüber akustischen Warnsystemen [BK02; PE03] erklärt sich durch die höhere Unterstützung des Fahrers bei eingreifenden Systemen. Diese werden als entlastend und das Fahren mit ihnen als weniger beanspruchend beschrieben, als mit informierenden Warnsystemen mit akustischen Signalen [BK02]. Weiter zeigt sich, dass bei der Bearbeitung von Nebenaufgaben eine Verschlechterung der Fahrleistung am effektivsten durch den Einsatz eines führenden Systems mit gerichteten haptischen Signalen verhindert wird. Ein solches System ersetzt visuelle Informationen, so dass der Fahrer bei kurzen Blickabwendungen trotzdem über die Spurposition informiert bleibt [BK02]. Akzeptanzprobleme treten auf, wenn die haptischen Signale sehr komplex werden: So wird ein gerichteter Eingriff mit überlagerter Vibration im Vergleich zu anderen Warnkonzepten als am wenigsten akzeptabel bewertet („Motor Priming“, [EFN+08]).

Damit zeigt sich, dass Spurführungssysteme, die dem Fahrer über gerichtete Lenkmomentveränderung haptische Signale übermitteln, anderen Querregelungsunterstützungen überlegen sein können. Voraussetzung ist eine gute Gestaltung des Feedbacks für den Fahrer. Dargestellt wurde aber auch die Gefahr, die in einem solchen System bei unangemessener Signalgestaltung liegt. Es ist daher festzuhalten, dass eingreifende Spurführungssysteme ein hohes Potential zur Unterstützung der Regelungsaufgabe des Fahrers besitzen. Die tatsächliche Qualität des Systems hängt jedoch wesentlich von der Art und Charakteristik des Eingriffs ab, die aus diesem Grund im nächsten Abschnitt genauer beleuchtet werden.

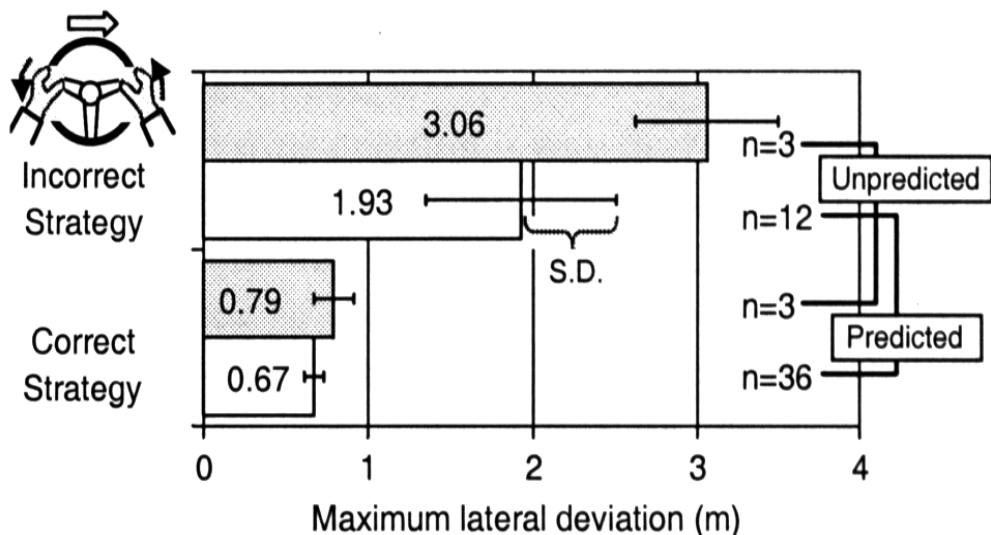


Abbildung 2-16: Vergleich der maximalen Querabweichung bei richtiger ("Correct Strategy") und bei falscher Interpretation ("Incorrect Strategy") des pulsierenden Lenkmoments "pulse-like steering torque" [SJ03].

2.2.3 Signalstärke und -form

Als entscheidend für die Akzeptanz eines eingreifenden Spurführungssystems und die Fahrleistung kann die Gestaltung der Signalkennlinie angesehen werden. Die Signalkennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Risiko eines Spurverlassens und einem Systemeingriff. Der Fahrer sollte stets über Systemeingriffe informiert sein, um so seiner Aufgabe der Systemüberwachung nachkommen und sein Verständnis der Systemzusammenhänge ständig aktualisieren zu können. Es ist dafür im unteren Bereich des Eingriffs eine Signalstärke zu fordern, die vom Fahrer sicher bewusst wahrgenommen werden kann und damit über der Wahrnehmungsschwelle⁶ liegt. Die hier betrachteten Untersuchungen liefern hierzu jedoch keinen Beitrag. Andererseits sollten die Signale nicht so stark sein, dass sie zu Schreck- und Halterelexen oder anderen kontraproduktiven Reaktionen führen. Erstaunlicherweise ist die Signalstärke in nur zwei der Studien tatsächlicher Untersuchungsgegenstand [ITK+00; PE03]. Hier werden allerdings keine Angaben über die absolute Größe der umgesetzten Momente gemacht, sondern lediglich ihre relative Größe zu einer das Fahrzeug autonom steuernden Variante beschrieben. Unterschiede zwischen diesen Varianten ergeben sich nur in der subjektiven Präferenz. Während sich in einer der beiden Studien die stärkste realisierte Unterstützung als die am besten akzeptierte Variante herausstellte [ITK+00], verweist die Untersuchung von [PE03] auf die individuell sehr unterschiedlichen bevorzugten Signalstärken und empfiehlt ein adaptierbares System.

Grenzwerte hinsichtlich der maximalen Eingriffstärke lassen sich nur bedingt ableiten. Aufgrund mangelnder Darstellung der Parametrisierung der untersuchten Systeme ist keine eindeutige Integration dieser Einzelergebnisse möglich. Allerdings kann abgeleitet werden, dass ein sprunghafter Systemeingriff unter den dort gegebenen Voraussetzungen ein Lenkmoment von 2Nm nicht überschreiten sollte [BK02; KVT01]. Bei größeren Lenkmomenten

⁶ Die Wahrnehmungs- oder auch Absolutschwelle gibt an, welche Reizintensität benötigt wird, damit der Mensch einen Reiz wahrnimmt. Dagegen bezeichnet die Unterschiedsschwelle (ebenmerklicher Unterschied), wie groß eine Veränderung der Reizintensität sein muss, damit sie als Unterschied wahrgenommen wird [STE75]. In der Regel werden für beide Schwellen die 50% Werte angegeben, bei denen 50% der Reize überhaupt bzw. als unterschiedlich wahrgenommen werden.

werden vereinzelt Haltere reflexe beobachtet, die nach ca. 70ms als Reaktion auf ein zusätzliches, sprungförmiges Lenkmoment auftreten [Kru00]. Einschränkend ist anzumerken, dass Zusatzlenkmomente, die im Fahrversuch als angenehm bewertet wurden, im Simulator bereits als zu stark beschrieben werden [Sch94].

Neben der Signalstärke ist die Form des Signals als wesentlich zu erachten. Die vorliegenden Studien aus der Literatur untersuchen neben einem sanften Eingriff in Form einer stetigen Zunahme der Signalstärke bis zum maximalen Eingriff pulsierende Signale in Rechteckform [SUZ98]. Letztere werden nicht von allen Fahrern richtig interpretiert und können daher nicht unmittelbar für die Verbesserung der Spurführung genutzt werden. Eine umfassende Analyse unterschiedlicher Signalformen wird durch die in der Literatur vorliegenden Studien aber nicht geliefert.

2.2.4 Charakteristik der Regelung des Spurführungssystems

Nachdem erste Hinweise für die Wichtigkeit der Ausgestaltung haptischer Signale für die Akzeptanz und die Unterstützung durch ein Spurführungssystem angeführt wurden, wird an dieser Stelle auf den Einfluss des Regelungsalgorithmus auf die Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers eingegangen. Betrachtet werden nur gerichtete haptische Eingriffe, die in Form von Lenkmomentveränderungen erfolgen, da nach dem Stand der Technik nur so ein eingreifendes Spurführungssystem sinnvoll umgesetzt werden kann (Abschnitt 2.1.2).

Die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Regelstrategien auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion wird von zwei Studien geleistet [SGH92; SLN97]. Realisiert wurden in diesem Zusammenhang drei unterschiedliche Regelungen, die jeweils unterschiedliche Modelle der Fahrzeugführung und damit unterschiedliche Führungsgrößen zugrunde legen. Die Regelung „Fahreroptimiert“ beruht auf der Querabweichung in einem definierten Vorausschau punkt [Naa98], während Variante „Spuroptimiert“ den Gierwinkelfehler relativ zum Fahrbahnverlauf im Vorausschau punkt als Kriterium heranzieht [YHI*96]. Die dritte Strategie „Queroptimiert“ moderiert das Signal anhand der Quergeschwindigkeit (Abbildung 2-17).

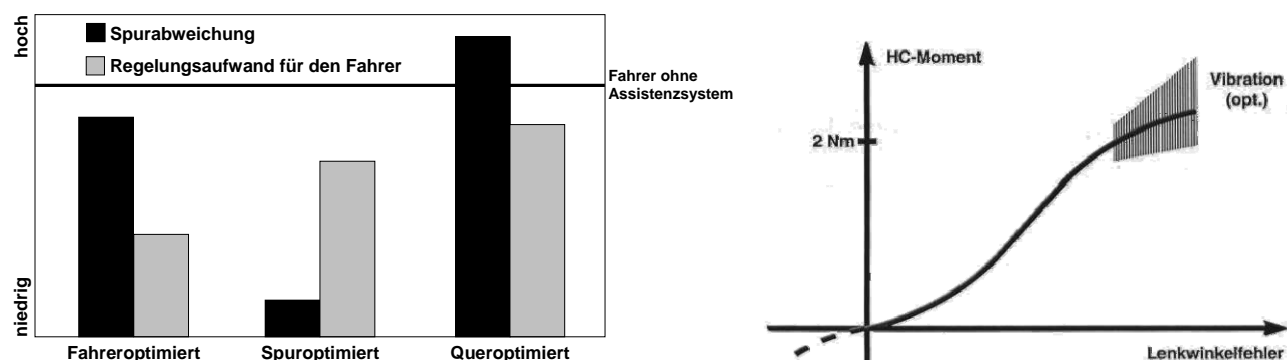


Abbildung 2-17: Wirksamkeit von Heading Control bei unterschiedlichen Auslegungen des Systemeingriffs und Momentengenerierung bei fahroptimierter Variante [Naa92].

Es zeigt sich, dass das Modell „Spuroptimiert“, welches die geringste Spurbabweichung (Standardabweichung der Querabweichung von der Fahrspurmitte) erzielt, den Fahrer mit einem hohen Aufwand der Ausregelung belastet (Abbildung 2-17). Demgegenüber kann bei leichter Zunahme der Spurbabweichung durch das Modell „Fahroptimiert“ die beste Unterstützung des Fahrers gewährleistet werden. Aufgrund dieser Ergebnisse ist anzunehmen, dass

eine Regelung, die auf der Querabweichung basiert, dem Fahrerverhalten bei der Querführung eines Kfz am nächsten kommt. Da weniger eine Optimierung der Spurabweichung, sondern eine Entlastung des Fahrers bei angemessener Spurhaltequalität im Vordergrund stehen sollte, ist eine dem Fahrer entsprechende Regelung der Systemeingriffe zu bevorzugen.

Der Zusammenhang von Spurabweichung und Systemeingriff beschreibt den Verlauf der Kennlinie, nachdem durch die Signalstärke das Niveau des Eingriffs festgelegt wird. Die hinreichende Beschreibung der Kennlinie erfordert die Parametrisierung von Form und Steilheit des Anstiegs sowie die Ausgestaltung in den Extrembereichen und um die Nulllage. Bei bereichsabhängigen Zusammenhängen, wie beispielsweise in dem von [LC95] untersuchten System, sind weiter dementsprechend die Einzelintervalle und ihre Übergänge zu beschreiben. Aus den Studien von [BK02; KVT01; LC95; Maa99] lässt sich ableiten, dass ein progressiver Verlauf insbesondere in den Extrembereichen als sinnvoll zu erachten ist, um bei starker Sollspurabweichung durch ein immer stärker ansteigendes Signal zu vermeiden, dass das Signal vom Fahrer nicht wahrgenommen wird. Allerdings muss der Fahrer beim intendierten Spurwechsel stärker gegen einen progressiven als einen linearen Verlauf arbeiten. Daher ist eine Begrenzung des maximalen vom System aufgebrauchten Lenkmoments zu fordern. Gleichzeitig sollte ein sehr flacher Anstieg um die Nulllage, wie beispielsweise in dem als nicht optimal beschriebenen, sehr schwach führenden System in der Untersuchung von [KVT01], vermieden werden. [LC95] wählen daher bereichsabhängig unterschiedliche Kennlinien. In einem bestimmten Bereich um die Nulllage wird gar nicht eingegriffen. Im Bereich größerer Querabweichungen wird ein linear zur Abweichung von der Spurmitte ansteigendes Lenkmoment gestellt, der im Extrembereich in einen progressiven Zusammenhang übergeht (Abbildung 2-18).

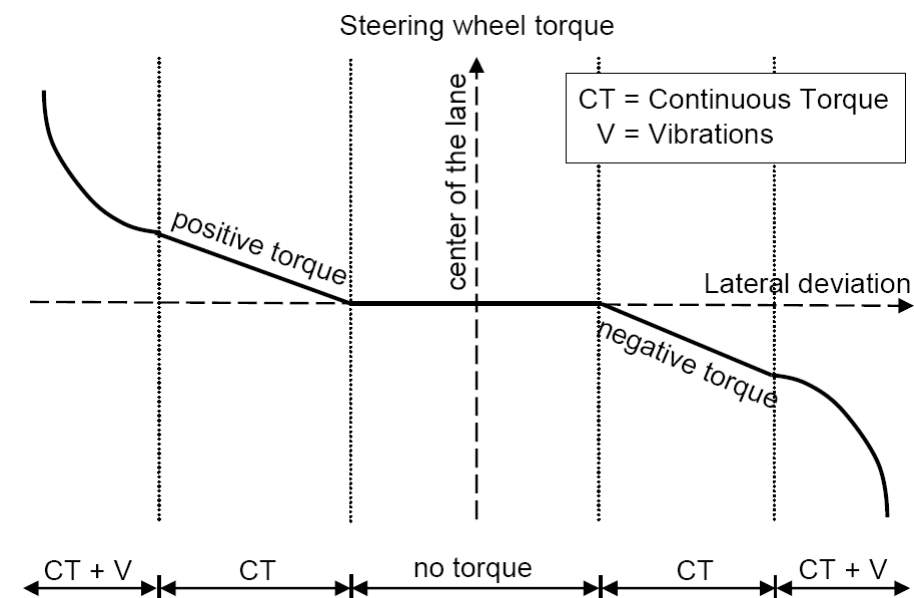


Abbildung 2-18: Bereichsabhängiges Profil des Lenkmomentalgorithmus [LC95].

Dies stellt eine Möglichkeit zur Vermeidung von schwachen, nicht spürbaren Eingriffen dar, die aus Gründen der Information des Fahrers über Systemeingriffe vermieden werden sollten. Fraglich ist, ob der Fahrer die Unterschiedlichkeit des Zusammenhangs von Abweichung und Systemeingriff zwischen den Bereichen versteht, akzeptiert und diese ihn tatsächlich bei der Regelung optimal unterstützen. Diese Veränderung des Zusammenhangs in den unterschiedlichen Bereichen erschwert für den Fahrer, Systemeingriffe in ihrer Quantität zu antizipieren.

Auch für eine optimale Gestaltung der Form des Zusammenhangs sind daher Kenntnisse über die Wahrnehmung von Lenkmomentveränderungen notwendig. Insbesondere sind Kenntnisse über Absolut- und Unterschiedsschwellen wünschenswert.

Zur Steilheit des Anstiegs können erste Empfehlungen aus den vorliegenden Studien getroffen werden [BK02; KVT01; Maa99]. Zu stark führende Systeme sind nicht erwünscht und führen zu erhöhtem Regelaufwand. Unter den gegebenen Umständen eines progressiven Anstiegs ist eine Kennliniengestaltung wie in dem realisierten schwach führenden System zu fordern (Abbildung 2-19). Auch dieser Befund kann durch die Ergebnisse von [LC95] gestützt werden, die eine Abflachung der Funktion fordern, um den Fahrer nicht mit haptischer Information zu überladen.

Der letzte hier betrachtete Aspekt der Signalgestaltung ist die Umsetzung eines Toleranzbereiches. Der Toleranzbereich bezeichnet einen Bereich um die Nulllage, in dem noch keine Systemregelung erfolgt. Dadurch kann der Fahrer bei angemessener Regelungsgüte das Fahrzeug ohne Systemregelung führen und muss nicht ständig „gegen das System kämpfen“ [SGH92]. Während zwei Studien [KVT01; LC95] auf die Wichtigkeit eines angemessenen Toleranzbereiches ohne Regelung hinweisen, können [SGH92], die als einzige den Toleranzbereich systematisch variieren, einen Einfluss der Größe des Toleranzbereiches nicht unterstreichen. [Maa99] stellt sogar eine Bevorzugung der Varianten ohne Toleranzbereich fest. Allerdings wird nur bei den ersten beiden Studien die Fahrzeugbewegung rückgemeldet, während die beiden letzteren in Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem durchgeführt wurden. Es bleibt daher offen, inwiefern sich die unterschiedlichen Ergebnisse durch die Untersuchungssituation erklären lassen.

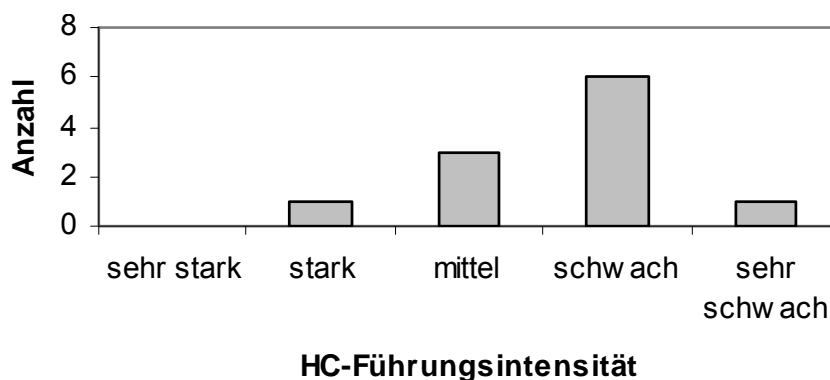


Abbildung 2-19: Von den Fahrern bevorzugte HC-Auslegungen abhängig von der Führungsintensität [KVT01].

2.2.5 Adaptation und Individualisierung von Spurführungssystemen

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an den Fahrer, die sich aus der Vielzahl der Situationen im Straßenverkehr ergeben, stellt sich die Frage, ob die Unterstützung des Fahrers an diese unterschiedlichen Situationen angepasst werden muss. Diese Überlegungen gehen davon aus, dass durch die Situation einerseits die Anforderungen an die Regelung durch den Fahrer verändert werden (z.B. wird in einer Engstelle eine viel präzisere Spurführung verlangt) und andererseits die Höhe der Beanspruchung des Fahrers beeinflusst wird (z.B. durch Telefonieren während der Fahrt). Demzufolge könnte also in bestimmten Situationen eine engere oder stärkere Unterstützung der Querregelung durchaus Vorteile bieten. Genauso ist eine Anpassung des Systems an den Zustand des Fahrers oder auch an verschiedene Fahrer (-

typen) denkbar. Eine Adaptation beinhaltet andererseits das Risiko, die Wirkzusammenhänge eines Systems zu verschleiern und damit für den Benutzer unvorhersagbar zu machen.

Die Betrachtung der Querregelung auf unterschiedlichen Straßentypen bzw. unterschiedlich breiten Straßen zeigt, dass bei schmaleren Straßen mehr Systemeingriffe auftreten [LC95], die eine geringere Standardabweichung der Querabweichung zur Folge haben [VGT+96]. Diese enge Regelung wird von den Probanden jedoch als störend empfunden. Auch [Mar01b] zeigt, dass Systeme bei Einsatz auf der Landstraße eher kritischer beurteilt werden als bei Fahrt auf der Autobahn. Weiter zeigen [VGT+96], dass sich die Regelungstätigkeit bei Dunkelheit von der bei Tageslicht unterscheidet. Bei Dunkelheit kommt es bei aktiviertem Spurführungssystem zur Abnahme hochfrequenter Lenkbewegungen bei gleichzeitiger Zunahme der Spurschwankung.

Einen Hinweis auf Adaptation eines Spurführungssystems auf die Belastung des Fahrers durch Nebenaufgaben liefern [KVT01]. In dieser Untersuchung wünschten alle Probanden bei gleichzeitiger Bewältigung einer Kommunikationsaufgabe eine Anpassung der Systemauslegung an die veränderten Bedingungen. Dass die Hälfte der Teilnehmer ein schwächeres System in dieser Sondersituation forderten, die andere Hälfte jedoch für einen stärkeren Eingriff plädierten, verdeutlicht die Problematik der Situationsadaptivität. Situative Merkmale können zusätzlich mit persönlichen Präferenzen interagieren und damit die Adaptation eines Systems weiter erschweren und komplizieren.

Eine ideale Adaptation an unterschiedliche Situationen kann also interindividuell sehr unterschiedlich aussehen. Diese unterschiedlichen Präferenzen lassen sich jedoch nicht durch klassische personenspezifische Merkmale wie Geschlecht, Alter oder Fahrerfahrung erklären [BK02] und so sind diese Merkmale nicht als Kriterium für eine Individualisierung geeignet. Es scheint allerdings, dass eine Gruppierung von Personen aufgrund ihrer fahrspezifischen Merkmale sinnvoll ist. Dagegen erscheint eine Fahrerklassifikation hinsichtlich der zugelassenen Querabweichung in „loose“ und „tight drivers“ [Bat99; Maa99] möglich. Auch die interindividuell unterschiedliche, intraindividuell aber sehr stabile „Handschrift des Lenkens“ [NEU01, S.8] ist ein Hinweis auf unterschiedliche Fahrertypen. Einschränkend kann jedoch festgehalten werden, dass zwar individuell stabile Unterschiede in den Präferenzen existieren, wenngleich eine „mittlere“ Auslegung für alle zu vertreten ist [BK02].

Die Frage nach der Adaptation eines Spurführungssystems auf den Fahrerzustand kann auf Grundlage der vorliegenden Studien nicht beantwortet werden. Potential und Schwierigkeiten einer solchen Anpassung beispielsweise an den Ermüdungszustand des Fahrers oder auch an seine Motivation sind kaum untersucht. Wenngleich subjektive Präferenzen sich minimal verschieben [Maa99; BK02], rechtfertigen Leistungsmaße eine veränderte Systemcharakteristik bei verschiedenen Zuständen nicht. Die besten Fahrleistungen werden sowohl wach als auch müde mit der gleichen Systemauslegung erzielt.

2.2.6 Zusammenfassung

Aus dem Stand der Literatur zeigt sich, dass ein eingreifendes Spurführungssystem mit haptischer Rückmeldung über das Lenkmoment die Fahraufgabe unterstützen kann. Sowohl auf Seiten der Regelungsgüte, d.h. der Leistung in der Spurführung, als auch bezüglich der

Belastung des Fahrers durch die Fahrzeugführung und -stabilisierung, sind durch den Einsatz eines solchen Systems Verbesserungen erzielbar. Weiter kann die visuelle Beanspruchung für den Fahrer verringert werden, was insbesondere im Hinblick auf die immer mannigfaltigeren und komplexeren Nebentätigkeiten von Interesse ist, die im Fahrzeug während der Fahrt ausgeführt werden.

Aus dem Vergleich von akustischen und haptischen Signalen lässt sich schließen, dass die Informationsvermittlung über Lenkmomentveränderungen vom Fahrer sehr viel schneller als bei akustischen Signalen erfolgen kann und damit eine maximale Unterstützung bei der zeitkritischen Querführung möglich ist. Andererseits zeigt sich in den vorliegenden Studien auch deutlich, dass diese Vorteile stark von der tatsächlichen Ausgestaltung des Signals abhängen. Bei nicht nutzergerechter Gestaltung der gerichteten haptischen Signale können diese Vorteile nicht nur verschwinden, sondern sich sogar ins Gegenteil umkehren. Aufgrund von Interpretationsschwierigkeiten benötigt der Fahrer bei ungünstigen Signalen länger um zu reagieren. Dies zeigt umso mehr die Wichtigkeit der angemessenen Gestaltung der Signalform und -stärke, die als entscheidend für die Akzeptanz eines eingreifenden Spurführungssystems und die Unterstützung des Fahrers durch das System bei der Fahrzeugführung anzusehen sind. Zu klären ist in diesem Zusammenhang die Größe des maximal vom Fahrer kontrollierbaren Eingriffs ins Lenkmoment als Obergrenze sowie die des minimalen Eingriffs als Untergrenze. Die hier betrachtete Literatur liefert hierzu jedoch kaum einen Beitrag. Lediglich [Kru00] berichtet von Haltereflexen auf ein zusätzliches, sprungförmiges Lenkmoment von über 2Nm auftreten. Haltereflexe können nicht als kontrollierte Reaktionen angesehen werden und sind daher zu vermeiden.

Bezüglich der Charakteristik der Regelung zeigt sich, dass aus den vorliegenden Studien zwar erste Hinweise, aber keine genauen Kennwerte zur optimalen Gestaltung eines eingreifenden Spurführungssystems abgeleitet werden können. Hierfür fehlt in den punktuellen Betrachtungen einzelner Systemumsetzungen eine systematische Variation der zur Umsetzung eines Spurführungssystems zu definierenden Parameter. Als funktionell erweisen sich Regelungen, die auf dem APE-Modell oder TLC beruhen (siehe Abschnitt 2.1.2). Die genaue Parametrisierung des Zusammenhangs von Abweichung und Systemeingriff ergibt sich aus den Möglichkeiten der Informationsvermittlung über Lenkmomentveränderungen. Hierzu fehlen aus den vorliegenden Studien jedoch genauere Kenntnisse über Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen bei gerichteten Lenkmomentveränderungen. Erst wenn diese Wahrnehmungszusammenhänge genauer bekannt sind, ist es möglich, die Signale so zu gestalten, dass sie den Fahrer in jeder Situation optimal bei der Querführung seines Fahrzeugs unterstützen. Zu diskutieren bleibt weiter die Ausgestaltung des Toleranzbereiches eines Systems. Ein zu kleiner Bereich, bzw. eine Regelung, die schon stark bei kleinen Abweichungen einsetzt, wird vom Fahrer nicht akzeptiert und zieht einen erhöhten Regelungsbedarf nach sich, obwohl die Regelungsgüte durch diese enge Führung verbessert wird. Zur Verringerung des Regelaufwands und damit zur Erhöhung der Akzeptanz ist daher ein Toleranzbereich um die Idealspur zu fordern.

Die Ergebnisse der dargestellten Studien lassen vermuten, dass eine nutzergerechte Gestaltung der Signalcharakteristik auch ohne Adaptation des Systems an situative Faktoren, wie Fahrumgebung, Fahrerzustand oder den Fahrertyp zu leisten ist. Wenngleich interindividuell stabile Unterschiede in den Präferenzen der Systemauslegung existieren, ist eine mittlere

Auslegung für alle vertretbar. Dennoch ist auf das Potential der Adaptation an den Fahrertyp hinzuweisen. Aufgrund der geringen zu erwartenden Leistungsgewinne durch Anpassung des Systems und der großen Schwierigkeiten bei der Erkennung und Klassifikation der relevanten Merkmale ist bislang von einem adaptiven System abzuraten.

Es ist festzuhalten, dass bei nutzergerechter Umsetzung eines eingreifenden Spurführungssystems die Entlastung und Unterstützung des Fahrers in höherem Maße möglich ist, als bei einem rein informierenden Warnsystem mit ungerichteter haptischer Information in Form einer Vibration. Schlüssel für die nutzergerechte Umsetzung ist dabei die Gestaltung des haptischen Signals. Die eingreifenden Systeme werden vom Fahrer in jedem Fall als positiv bezüglich der Vermeidung sicherheitskritischer Situationen bewertet. Die teilweise kontroversen Ergebnisse in der Gesamtzufriedenheit mit eingreifenden gegenüber warnenden Systemen sind als Aufforderung für eine angemessene Gestaltung der Informationsvermittlung an den Fahrer zu werten. Während ein den Fahrerbedürfnissen und -verhaltensweisen entsprechend umgesetztes Assistenzsystem nicht nur akzeptiert wird, sondern auch die Fahrleistung verbessert, bewirkt eine vom Fahrer als künstlich empfundene Regelung eine Störung seiner eigenen Regeltätigkeit und wird daher nicht akzeptiert. Leider erlauben die dargestellten Studien nur sehr wenige Aussagen über die optimale Signalgestaltung, da in den meisten Fällen Einzelsysteme evaluiert wurden. Es erfolgten kaum systematische Variationen der Systemparameter. Die Kenntnis eines optimalen Wertebereichs der haptischen Signale und von bedeutsamen Einflussfaktoren ist als grundlegend für die Gestaltung und Parametrisierung eines Spurführungssystems zu betrachten. Aus diesem Grund ist zu fordern, die Wahrnehmungszusammenhänge von Lenkmomentveränderungen als haptische Signale, die über das Lenkrad vermittelt werden, näher zu untersuchen und damit die Entwicklung nutzergerechter Spurführungssysteme zu ermöglichen.

2.3 Haptische Signale in der Lenkung

Aus vorangehendem Abschnitt ist hervorgegangen, dass durch den Einsatz eines Spurführungssystems die Regelgüte bei der Bewältigung der Fahraufgabe verbessert werden kann. Eingreifende Systeme erweisen sich gegenüber warnenden sogar überlegen und bieten ein hohes Potential zur Unterstützung und Entlastung des Fahrers. Die Betrachtung unterschiedlicher Systemauslegungen macht jedoch deutlich, dass diese Vorzüge der eingreifenden Spurführungssysteme mehr noch als bei warnenden Systemen von der Parametrisierung des Systems und der Signalgestaltung abhängig sind. Als grundlegend für eine nutzergerechte Ausgestaltung der Informationsvermittlung sind Erkenntnisse über die Wahrnehmung von Lenkmomentveränderung anzusehen. Daher werden an dieser Stelle grundlegende Zusammenhänge der menschlichen Wahrnehmung haptischer Signale beleuchtet.

2.3.1 Das Lenkrad als haptische Schnittstelle im Fahrzeug

Das Lenkrad als Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug erlaubt dem Fahrer nicht nur die Steuerung des Fahrzeugs, sondern vermittelt ihm eine Vielzahl von Informationen über den Zustand des Fahrzeugs und seiner Umwelt. Neben dem Lenkradwinkel ist das Lenkmoment bei dieser Informationsrückmeldung an den Fahrer als wichtigste Komponente zu betrachten.

Während der Fahrer über die Lenkradstellung allein über den Einschlagwinkel der Vorderräder informiert wird, beinhaltet das Lenkmoment eine Vielzahl unterschiedlicher Informationen. Die Bandbreite reicht von Informationen über die Seitenkraft und Fahrzeugbeschleunigungen bis hin zum Straßenzustand und dem Reibbeiwert der Fahrbahn [AMN92; Bac00; Bra71; FG55; Jun90; Sto92; Wal72]. Neben diesen dynamischen Faktoren wird das Lenkmoment auch durch statische Faktoren moderiert. Von den statischen Einflussfaktoren sind hier beispielhaft Achs- und Radgeometrie sowie die Ausgestaltung des Lenkstranges, insbesondere Übersetzung, Kinematik, Elastizität sowie Art und Auslegung einer Servounterstützung zu nennen. Zu beachten ist, dass der Großteil dieser Einflussfaktoren nicht-lineare Auswirkungen auf das Rückstellmoment der Lenkung besitzt. Daher ist viel Fahrerfahrung notwendig, um die enthaltene Informationen nutzen zu können und aus dem Rückstellmoment Rückschlüsse über den Straßenzustand zu ziehen [Bub77; Bub01; Rue93]. Wie im vorangehenden Abschnitt 2.1 dargestellt wurde, ist dieser Kanal auch besonders geeignet für die Rückmeldung eines Spurführungssystems. Trotz der Vielzahl der bereits enthaltenen Informationen wäre es deshalb wünschenswert, über diesen Kanal Rückmeldungen zur Spurführung an den Fahrer zu übertragen.

2.3.2 Wahrnehmung haptischer Signale beim Menschen

Die haptische Wahrnehmung des Menschen ist als Zusammenfassung von taktiler und propriozeptiver Sensorik zu verstehen [Rue93] und gilt als schnellster Kanal der Informationsvermittlung an den Menschen. Gegenüber visueller und akustischer Wahrnehmung ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit um ca. 20 bis 30% erhöht [Mut01]. Propriozeptive Wahrnehmung beschreibt die eigene Körperstellung und -haltung im Raum über das Bewegungs- und Kraftempfinden durch Rezeptoren an Muskeln, Sehnen und Gelenkkapseln [RBL02]. Diese Muskelrezeptoren ermitteln die wirksamen Muskelkräfte über die Messung von elastischen Längenänderungen innerhalb des Muskels und besitzen bei äußeren physikalischen Reizen das Übertragungsverhalten eines PD-Glieds [Bub77; Mue93]. Die Empfindungsstärke ist demnach nicht nur von der Stärke, sondern in gleichem Maße von der Geschwindigkeit der Änderung abhängig. Schnelle Lenkmoment- oder Lenkwinkeländerungen werden eher und stärker wahrgenommen als langsame. Die taktile Wahrnehmung als Teil der Oberflächensensibilität beschreibt die Rezeption von Druck, Berührungen und Vibrationen durch Mechanosensoren in der Haut [BS03; Mue93; Sch03] (Abbildung 2-20).

Die Dichte dieser Sensoren ist in einzelnen Hautarealen sehr unterschiedlich. Zur Beschreibung der Wahrnehmung von Lenkmomenten wird daher im speziellen auf die taktile Wahrnehmung der Haut der Handinnenflächen eingegangen. Die Handinnenflächen zählen mit ca. 17.000 mechanorezeptiven Nervenfasern zu den am stärksten innervierten Hautregionen des menschlichen Körpers. Da es sich dabei ausschließlich um schnelle Nervenfasern der Gruppe II [RBL02] handelt, geschieht die Reizübertragung ins Rückenmark innerhalb weniger Millisekunden und unterstreicht damit die hohe zeitliche Auflösung der taktilen Wahrnehmung. Am sensibelsten reagieren die Mechanosensoren in der Hand auf die Geschwindigkeit einer Druckveränderung. Somit lässt sich aus der Mechanosensorik des Menschen schließen, dass der Anstieg eines haptischen Signals dominant auf die Wahrnehmung wirkt.

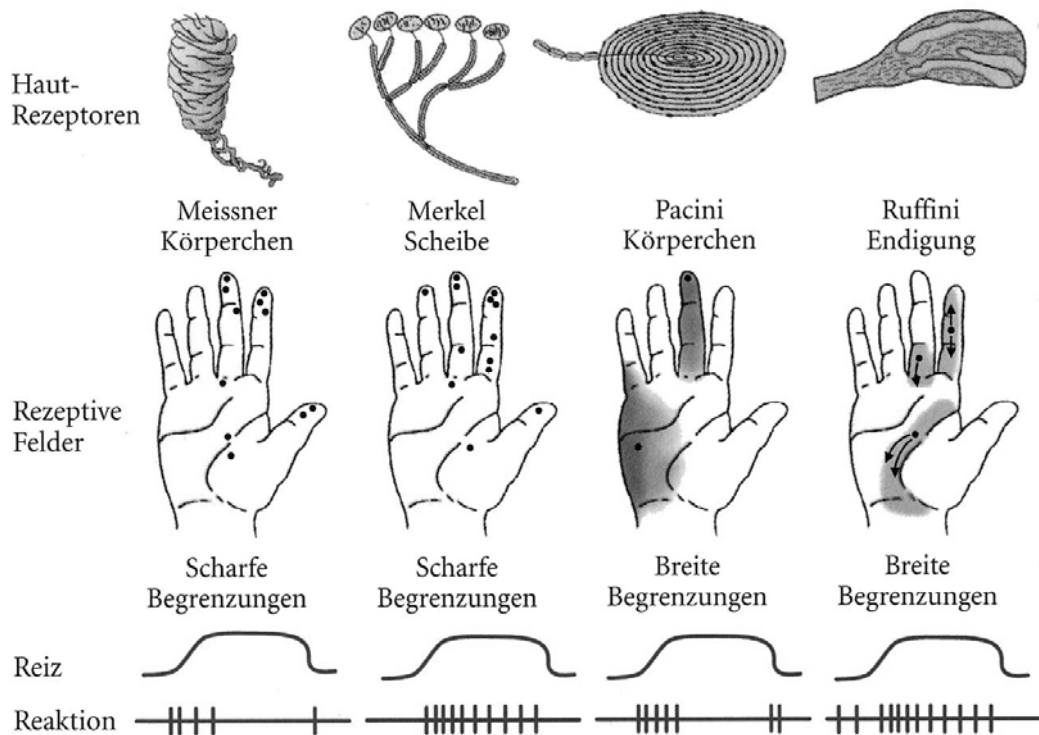


Abbildung 2-20: Rezeptive Felder und Reizantworten von Mechanosensoren [RBL02].

Die Wahrnehmung von Vibrationen zeigt sich darüber hinaus als stark von der Frequenz des Anregungssignals abhängig (Abbildung 2-21). Während die Ergebnisse von [Bie98], der die höchste Empfindlichkeit für einen Bereich von 8 bis 16 Hz angibt, nicht in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen zur menschlichen Sensorik stehen [Sch93b], deckt sich der von [Mut01] beschriebene Bereich der höchsten Empfindlichkeit für die Wahrnehmung von Vibrationen zwischen 100 und 300 Hz mit den Eigenschaften der Mechanosensorik des Menschen. Zu vermuten ist ein überlagernder Einfluss der Propriozeption, der die Wahrnehmungsschwelle herabsetzt.

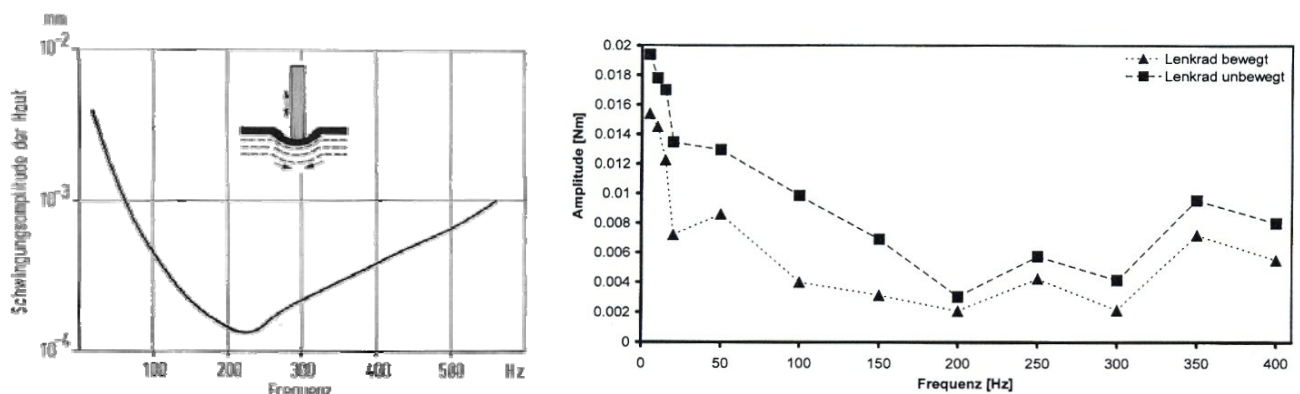


Abbildung 2-21: Frequenzabhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle für das Vibrationsempfinden [Sch93b] und bei periodischen Lenkmomentänderungen [Bus03].

2.3.3 Bewegungssteuerung als Reaktion auf haptische Signale

Zu beachten ist, dass es sich bei besonders schnellen haptischen Reiz-Reaktions-Mechanismen zum Teil um Reflexe handelt. Reflexe laufen in der Regel unbewusst ab (Abbildung 2-22) und werden durch basale zentralnervöse Strukturen wie dem Rückenmark gesteuert [Sch88]. Sie

stellen vorprogrammierte, meist angeborene Handlungsprogramme dar, die von Auslösereizen aufgerufen und vollständig ausgeführt werden. Im Rahmen der Bewertung eines Heading-Control-Systems stellte [Kru00] etwa 70ms nach sprunghafter Lenkmomentenveränderung eine charakteristische entgegen gesetzte Spitze des Fahrer-Lenkmoments fest, die aus dem Eigenreflex der Haltemuskulatur erfolgt („long-loop-reflex“, [Sch88]).

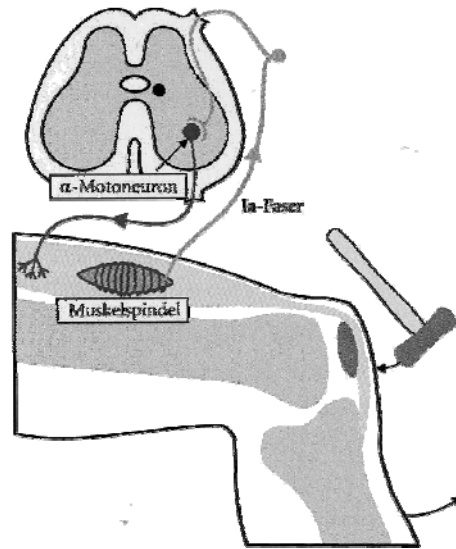


Abbildung 2-22: Patellarsehnenreflex. Bei Aktivierung der Muskelspindel eines Muskels aktiviert eine IA-Afferenz über eine direkte synaptische Verschaltung das α -Motoneuron desselben Muskels, der daraufhin kontrahiert [Sch03].

Demzufolge ist eine schnelle haptische Informationsvermittlung nicht uneingeschränkt zu fordern. Vielmehr rückt eine für den Menschen angemessene Vermittlung dieser Information in den Vordergrund, bei der die Information schnell und eindeutig vom Fahrer aufgenommen werden kann, ohne jedoch eine reflexartige und unangemessene Reaktion zu provozieren. Es sind Signale gefordert, die schnelle, aber willkürlich gesteuerte Bewegungen beim Fahrer ermöglichen. Nur bei bewussten und geplanten Bewegungen kann weiter davon ausgegangen werden, dass der Fahrer System und Fahrzeug jederzeit übersteuern und kontrollieren kann. Anzumerken ist, dass die Kontrolle bewusster Bewegungen kognitive Ressourcen in Anspruch nimmt. Insbesondere der Soll-Ist Vergleich einer Verhaltenssteuerung als geschlossener Regelkreis führt aufgrund der benötigten Ressourcen zu einer Latenz von ca. 150 bis 200ms zwischen der Reizdarbietung und dem Beginn einer motorischen Reaktion darauf [Sch88]. Diese Modelle sind für die Steuerung fortwährender motorischer Prozesse wie z. B. der Spurführung eines Fahrzeugs auf der Autobahn äußerst relevant.

Dieser Ist-Soll Vergleich wird als TOTE-Einheit (Test-Operate-Test-Exit) beschrieben [MGP60], bei der in einem Regelkreis der aktuelle Zustand, so lange mit dem gewünschten Resultat verglichen und korrigiert wird, bis es zur Übereinstimmung der beiden kommt. Vergleichbar mit Millers TOTE-Einheit definiert [Hac98] sog. Vergleich-Veränderungs-Rückkopplungseinheiten (VVR) als Einheiten der Bewegung. Auch er nimmt eine sequentielle Struktur der Regulation an und trennt zwischen Vorbereitung und Ausführung einer Handlung, wobei das Resultat des einen Prozesses die Ausgangslage für den jeweils anderen bestimmt.

Ein zweiter Typ von Kontrollsystemen motorischer Bewegungen ist das Open-Loop-System, bei dem die Bewegungsmuster a priori strukturiert sind und ohne Korrektur während des Ablaufes ausgeübt werden. Solche Bewegungen können selbst nach Deafferenzierung und

damit ohne Feedback ausgeführt werden [Tau76; PB78; FWH77]. Untersuchungen von [Sha77] konnten zeigen, dass Bewegungen mit einer Dauer von bis zu 1.3 s mit Hilfe motorischer Programme als open-loop Prozess gesteuert werden können. Längere Bewegungen können nicht komplett vorbereitet werden, sondern benötigen eine weitere Ausgestaltung im Verlauf der Bewegung. Damit ist dieser Anteil der Bewegungssteuerung, der nicht auf eine afferente Rückmeldung angewiesen ist, im Sinne einer Vorsteuerung zu verstehen (Abbildung 2-23) [HOT63; MAK+82]. Die Parametrisierung der motorischen Programme wird essentiell durch Lernerfahrung optimiert.

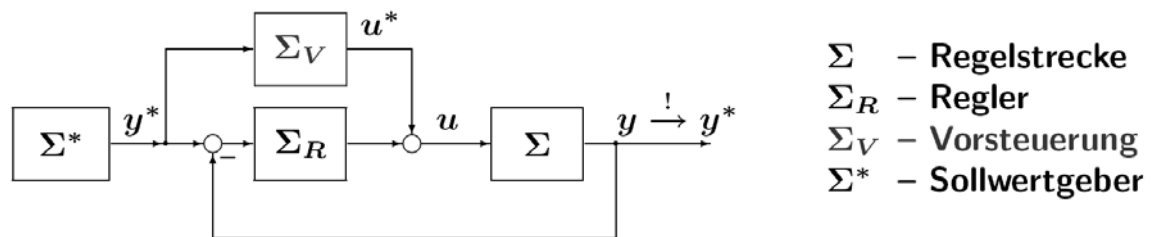


Abbildung 2-23: Folgeregelung mit Zwei-Freiheitsgrad-Struktur (Horowitz, 1963)

In seinem Modell der Ebenen der Handlungssteuerung beschreibt [Ras83] den Grad der notwendigen bewussten Kontrolle oder Aufmerksamkeitszuwendung in Abhängigkeit von der Lernerfahrung (Abbildung 2-24): Auf der fertigkeitbasierten Ebene werden die Leistungen des Menschen von gespeicherten Mustern aus vorprogrammierten Anweisungen bestimmt. Hier liegt für jede Situation eine adäquate Antwort sofort vor, die Bewegungssteuerung läuft automatisiert und unbewusst ab.

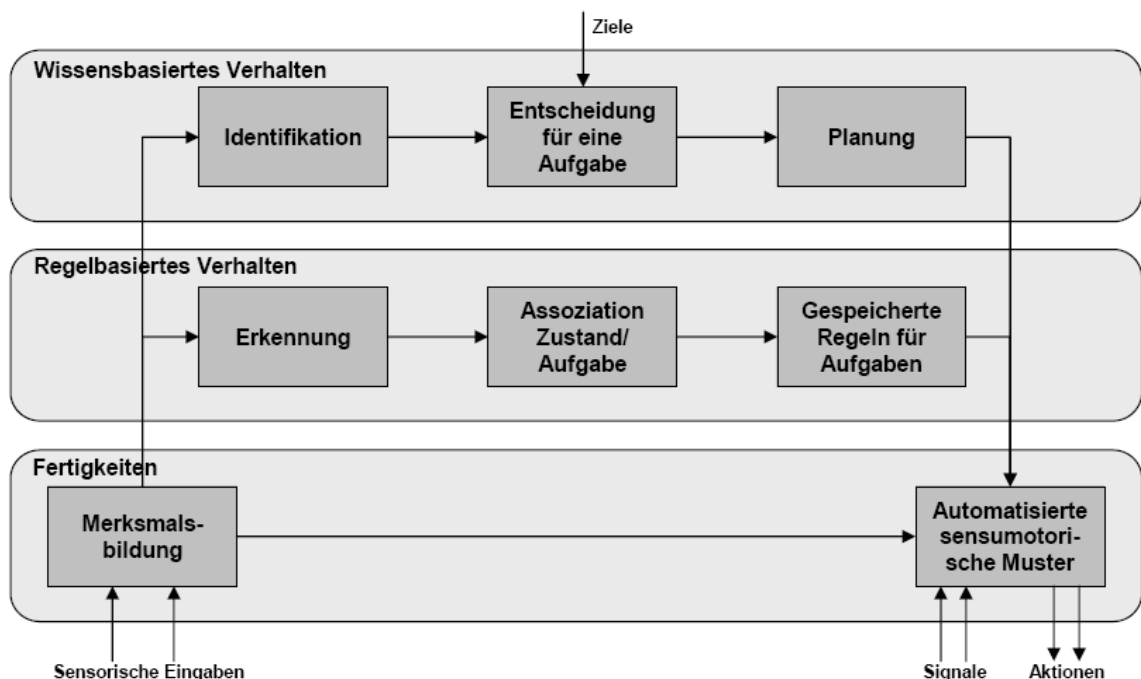


Abbildung 2-24: Modell der Ebenen der Handlungssteuerung [Ras83].

Die regelbasierte Ebene hingegen kommt zur Anwendung, wenn bereits bekannte Probleme angegangen werden. Diese Probleme können mit Hilfe bereits gespeicherter, also gelernter Regeln der Form „wenn ..., dann ...“ gelöst werden. Auf dieser Ebene gilt es, mit Hilfe der Informationen aus der Umwelt bestimmte geübte Bewegungsprogramme zu parametrisieren, ohne jedoch eine vollständige bewusste Planung vorzunehmen. Die wissensbasierte Ebene kommt bei neuartigen Situationen zum Tragen, die das Verwenden bewusster analytischer

Prozesse und gespeicherten Faktenwissens erfordern und damit durch hohen kognitiven Aufwand und geringe Automatisierung gekennzeichnet sind. Handlungsregulation auf dieser Ebene ist als die aufwändigste und beanspruchendste zu betrachten. Mit zunehmender Übung bewegt sich der Mensch dabei von der wissensbasierten zur fertigkeitsbasierten Ebene, so dass Handlungsabläufe immer weiter automatisiert werden und sich die Beanspruchung für den Ausführenden verringert.

2.3.4 Bisherige Erkenntnisse zu Lenkmomenten als haptische Signale für Spurführungsassistenz

Bei Spurverlassenswarnern und Spurführungssystemen werden dem Fahrer über zusätzliche Lenkmomente Informationen über seine Spurposition zu vermittelt und er dabei zu unterstützt, auf die Idealspur zurückzufinden. Für die Ausgestaltung fehlen noch umfassende Kenntnisse über die Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers auf diese Zusatzmomente. Daher ist das Ziel dieses Vorhabens die Untersuchung der Auswirkungen solcher Lenkmomentsignale auf den Fahrer. Erste Studien zur Betrachtung von Lenkungsfehlern in einer Überlagerungslenkung [NK03] und zur Gestaltung haptischer Warnsignale im Fahrzeug [GSN+05] liefern sehr gute Hinweise auf den Einfluss haptischer Information bei der Wahrnehmung und Ausregelung von Signalen im Lenkungsstrang. Aus der zweitgenannten Arbeit konnte neben Wahrnehmungsschwellen insbesondere identifiziert werden, welche Amplituden der Lenkmomentsprünge vom Fahrer als Störung bewertet werden. Hierbei wurde als 100% Wahrnehmungsschwelle⁷ ein sprungförmiges Zusatzmoment von 0.8Nm im Stand bzw. 1.2Nm bei Fahrt im Fahrsimulator ermittelt. Damit konnten die Wahrnehmungsschwellen [Bus03; SGH92] im Bereich von 0.2 bis 0.6Nm (75% Schwelle, abhängig von weiteren Einflussfaktoren) bzw. 0.8Nm (75% Schwelle) repliziert werden (Abbildung 2-25). Ein Einfluss der Richtung des Zusatzmomentes aus der Nulllage konnte nicht festgestellt werden [Bus03].

Als wesentlicher Einflussfaktor konnte neben der Amplitude insbesondere die Anstiegssteilheit des Zusatzmomentes [Bus03; GSN+05] identifiziert werden (Abbildung 2-25, rechts). Die Effekte eines Ausgangslenkmomentes vor Zuschaltung eines Momentes z.B. durch Kurvenfahrt und die damit kombinierte Richtung des Zusatzmomentes im Sinne einer Erhöhung oder Reduktion des Ausgangsmomentes erscheinen vernachlässigbar gering.

Die Studien wurden in einer statischen Fahrsimulation durchgeführt und können daher den Einfluss kinästhetischer Rückmeldung an den Fahrer nicht berücksichtigen. Die gewonnenen Grenzwerte und auch die Ergebnisse zum Einfluss eines Ausgangslenkmomentes (Kurvenfahrt) sind somit nur unter Vorbehalt zu interpretieren, da der wesentliche Einfluss kinästhetischer Information auf die Wahrnehmung [SSN+06] und die Reaktion des Fahrers [NK03] deutlich aufgezeigt wurde. Diese Untersuchungen unterstreichen die Wichtigkeit der Fahrzeugreaktionen für die Störungswahrnehmung. Offen bleibt die Auswirkung der vollständigen Informationsdarbietung auf den Fahrer über visuelle, kinästhetische und haptische Signale und seine Interaktion mit dem Fahrzeug bei Zusatzlenkmomenten. Aus den bisherigen Erkenntnissen zum Einfluss der Gierbewegung auf die Störungsbewertung [SCM07] wird

⁷ Die 100% Wahrnehmungsschwelle beschreibt die Reizstärke, ab der Signale von 100% der Versuchspersonen wahrgenommen werden. Bei der 75% Schwelle nehmen dagegen nur 75% der Teilnehmer das Signal wahr.

angenommen, dass die Kurvenfahrt entgegen den bisherigen Ergebnissen [GSN+05] einen bedeutsamen Einfluss auf die Bewertung zusätzlicher Lenkmomente besitzt. Aufgrund der hohen Dynamik der aus der Lenkungsanregung resultierenden Fahrzeugbewegungen, empfiehlt sich eine Untersuchung im Realfahrzeug.

Neben der Wahrnehmungsschwelle gibt die Untersuchung von [GSN+05] Aufschluss über die Störungsschwelle. Dieser Wert kennzeichnet den Übergang von wahrgenommenen aber nicht störenden Zusatzmomenten zu wahrgenommenen und als Störung bewerteten Aufschaltungen. Die ermittelte Störungsschwelle für sprungförmig ansteigende Zusatzmomente liegt bei 2Nm [GSN+05]. Damit ergibt sich ein sehr schmaler Nutzbereich der sprungförmigen Zusatzmomente zwischen der ermittelten 100% Wahrnehmungsschwelle von 1.2Nm und dem Übergang zur Störung bei 2Nm. Da diese Schwellen im statischen Fahrsimulator ermittelt wurden, ist die Übertragbarkeit dieses Nutzbereiches auf das Realfahrzeug zu überprüfen. Offen bleibt an dieser Stelle, inwiefern dieser Bereich durch Variation des Einflussfaktors Anstiegssteilheit aufgefächert werden kann.

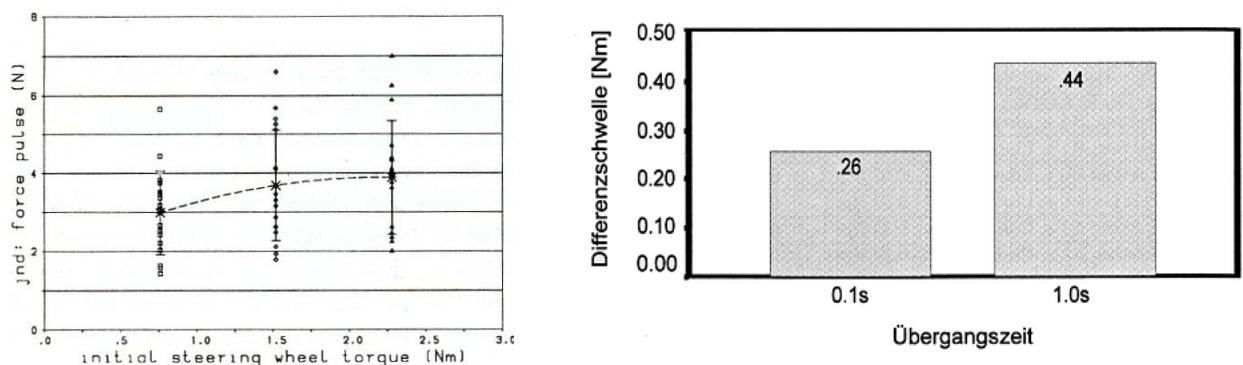


Abbildung 2-25: Geschätzte Unterschiedsschwellen (in N, mit $r=0.19\text{m}$) bei verschiedenen Ausgangslenkmomenten [Sch94]. Differenzschwellen für Lenkmomentänderungen in Abhängigkeit von der Übergangszeit [Bus03].

Hinsichtlich der Kontrollierbarkeit von Lenkungseingriffen sind maximal zumutbare Anregungen durch zusätzliche Lenkmomente zu bestimmen. Auch hierzu ist der Literatur recht wenig zu entnehmen. [DBT+08] berichten von einer Studie in einem bewegten Fahrsimulator, in der Probanden mit Zusatzlenkmomenten in Höhe von 3Nm konfrontiert wurden. Die Zusatzmomente wurden bei anliegendem Ausgangslenkmoment von 3Nm zugeschaltet, so dass für den Fahrer ein Handmoment von 6Nm resultiert. Aus dem Sicherheitsstandard für elektromechanische Hilfskraftlenkungen [VDA04] geht hervor, dass Zusatzmomente im Sinne von Selbstlenkern beliebiger Amplitude immer dann als akzeptabel angesehen werden können, wenn eine Abschaltung innerhalb von 20ms erfolgt. Damit wird für die vorliegende Arbeit neben der Stärke eines Zusatzmomenteneingriffs auch die Dauer des anliegenden Zusatzmomentes als weiterer Einflussfaktor hervorgehoben.

2.3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Wahrnehmungszusammenhänge für den haptischen Kanal beschrieben und auf die menschliche Bewegungssteuerung als Antwort auf haptische Signale eingegangen. Da hier speziell über das Lenkrad vermittelte Signale von Interesse sind, ist weiter beleuchtet worden, welche Informationen dort als Rückmeldungen des Fahrens bereits vorliegen. Diese Rückmeldungen können in einem weiteren Schritt von zusätzlichen Lenkmo-

menten überlagert werden, um dem Fahrer Informationen z.B. zur Position innerhalb der Fahrspur oder zu vorgeschlagenen Trajektorien zu vermitteln.

Insgesamt erscheinen die bisherigen Erkenntnisse zur Wahrnehmung und Reaktion auf solche zusätzlichen Lenkmomente noch sehr unvollständig. Während erste Arbeiten vorliegen, die die Wahrnehmungsschwellen dieser Signale ermittelt haben, fehlt insbesondere im Bereich maximal zulässiger und vom Fahrer noch beherrschbarer Signale ein umfassendes Bild. Auch in Bezug auf weitere Einflussfaktoren ist der bisherige Forschungsstand lückenhaft. So sind neben der Amplitude auch die Anstiegsteilheit und die Dauer eines Zusatzmoments als erste Einflussfaktoren auf Seiten der Signalgestaltung identifiziert. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der Bewertung durch den Fahrer fehlen bislang. Daneben wurde in den wenigen bisherigen Studien kaum auf situative Einflüsse eingegangen. Es bleibt zunächst offen, ob die Zusatzmomente z.B. während unterschiedlicher Fahrmanöver (z. B. Geradeaus- und Kurvenfahrt) oder verschiedener Lenkaktivität (z. B. während eines Spurwechsels) anders wahrgenommen werden.

2.4 Schlussfolgerungen und Fragestellung

Gegenwärtige Entwicklungen auf dem Gebiet der Fahrerassistenz versuchen, den Fahrer bei der Ausführung seiner Fahraufgabe umfassend zu unterstützen. Nachdem teilautonome Systeme zur Übernahme der Längsführung (ACC) bereits auf dem Markt sind, gibt es erste Umsetzungen zur Unterstützung der Querverführung. Wie aktuelle Arbeiten zeigen, ist es dabei nicht nur möglich, den Fahrer akustisch oder mit Hilfe von Lenkradvibrationen vor einem Spurverlassen zu warnen. Vielmehr erscheint es vielversprechend, den Fahrer bei der Ausführung seiner Querregelungsaufgabe zu unterstützen und bei drohendem Spurverlassen aktiv in die Fahrzeuglenkung einzugreifen.

Ein solcher Eingriff über zusätzlich aufgeschaltete Lenkmomente stellt für den Fahrer eine haptische Information dar. Es konnte gezeigt werden, dass solche gerichteten Lenkmomente als haptische Signale gegenüber akustischen oder Vibrationen vom Fahrer schneller verarbeitet werden können und es damit zu einer verbesserten Spurhaltung kommt. Zu einer schnelleren Änderung der Bewegungstrajektorie des Fahrzeugs ist eine solche Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle durchaus wünschenswert. Gleichzeitig wird in der vorliegenden Literatur in Einzelfällen auf Akzeptanzprobleme oder Schwierigkeiten bei der richtigen Interpretation dieser gerichteten Lenkmomente hingewiesen. Dies zeigt die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit einer solchen Systemumsetzung vom Design der Signale und damit der Rückmeldung an den Fahrer. Außerdem muss gewährleistet sein, dass der Fahrer stets in der Lage ist, das System problemlos zu übersteuern und das Fahrzeug vollständig zu kontrollieren. So müssen die Zusatzmomente einerseits sicher wahrnehmbar sein, dürfen aber andererseits nicht zu ungewünschten Reaktionen (z. B. Haltereflexen) oder gar einem Erschrecken des Fahrers führen. Auch dieser Punkt unterstreicht die Wichtigkeit des Signaldesigns für die unterstützende Wirkung des Fahrerassistenzsystems.

Aus der Analyse der in der Literatur beschriebenen Arbeiten zu den in die Lenkung eingreifenden Spurführungssystemen lässt sich lediglich eine Reihe von Anhaltspunkten ermitteln. Ein vollständiges Bild über die Wahrnehmungs- und Reaktionszusammenhänge des Fahrers

auf gerichtete haptische Signale existiert bislang nicht. Dies ist jedoch Voraussetzung für ein optimales Signaldesign. Aus diesem Grund wurden Modelle und Erkenntnisse der Grundlagenforschung zur Wahrnehmung haptischer Signale losgelöst vom Kontext Spurführungssassistenten betrachtet. Die vorliegenden Arbeiten liefern erste Erkenntnisse z.B. zur Wahrnehmungsschwelle und diese moderierende Einflussfaktoren, wie der Anstiegssteilheit. Insbesondere im mittleren Wahrnehmungsbereich zwischen Wahrnehmungsschwelle und maximal zumutbaren Eingriffen liegen kaum Erkenntnisse vor. Daher besteht genau hier erheblicher Forschungsbedarf.

Vor Verwendung zusätzlicher Lenkmomente im Rahmen eines Fahrerassistenzsystems ist zu gewährleisten, dass der Fahrer stets in der Lage ist, solche Eingriffe zu kontrollieren und zu übersteuern. Der RESPONSE Code of Practice [PRE06] definiert diesbezüglich das Konzept der Kontrollierbarkeit (Controllability). Diese Arbeit versucht das im Code of Practice definierte Konzept umzusetzen und liefert ein Vorgehen zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von gerichteten Zusatzlenkmomenten. Zentrale Punkte dabei sind die Einhaltung methodischer Standards und die Bestimmung maximal zumutbarer Eingriffe. Eine Beschreibung der Vorgaben des Code of Practice erfolgt im folgenden Kapitel 3.

Diese Arbeit setzt sich somit zum Ziel, die Wirkzusammenhänge zwischen Signal- bzw. Situationsparametern sowie der Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers bei zusätzlich aufgeschalteten Lenkmomenten zu beschreiben und Einflussfaktoren zu identifizieren. Daraus können Obergrenzen des Eingriffs über zusätzliche Lenkmomente ermittelt werden. Weiter soll der Versuch unternommen werden, diese Zusammenhänge unabhängig vom Fahrzeug und seinem dynamischen Fahrverhalten zu beschreiben. Hierfür gilt es, die Führungsgrößen des Menschen zu identifizieren, die seine Empfindung bestimmen und diese in Zusammenhang zu seinen Bewertungen zu stellen. So ist davon auszugehen, dass nicht allein das Zusatzmoment in die Bewertung des Fahrers einfließt, sondern auch die durch die Lenkreaktion resultierende Fahrzeugbewegung. Diese Zusammenhänge gilt es zu ermitteln.

3 Testmethodik und Versuchsdesign

3.1 Der RESPONSE Code of Practice: Controllability von Fahrerassistenzsystemen

Der im Rahmen des Projektes RESPONSE 3 entwickelte europäische Code of Practice [PRE06] dient einer beschleunigten Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. Der Code of Practice als Übereinkunft europäischer OEMs und „best practice“ definiert einen Prozess der sicheren Entwicklung und Testung von neuen Fahrerassistenzsystemen bis zur Freigabe und Markteinführung und berücksichtigt neben Fahrer und System auch rechtliche Gesichtspunkte. Im Code of Practice werden Methoden für die Risikobewertung und die Evaluation der Kontrollierbarkeit (Controllability) vorgeschlagen und dem Entwickler in Form von Checklisten zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Systementwicklung zur Seite gestellt. Dadurch soll gewährleistet werden, dass alle spezifizierten Aspekte im Entwicklungsprozess in Betracht gezogen werden. Abbildung 3-1 zeigt den in RESPONSE 3 vorgeschlagenen Entwicklungsprozess und die für die Bewertung der Kontrollierbarkeit notwendigen Schritte.

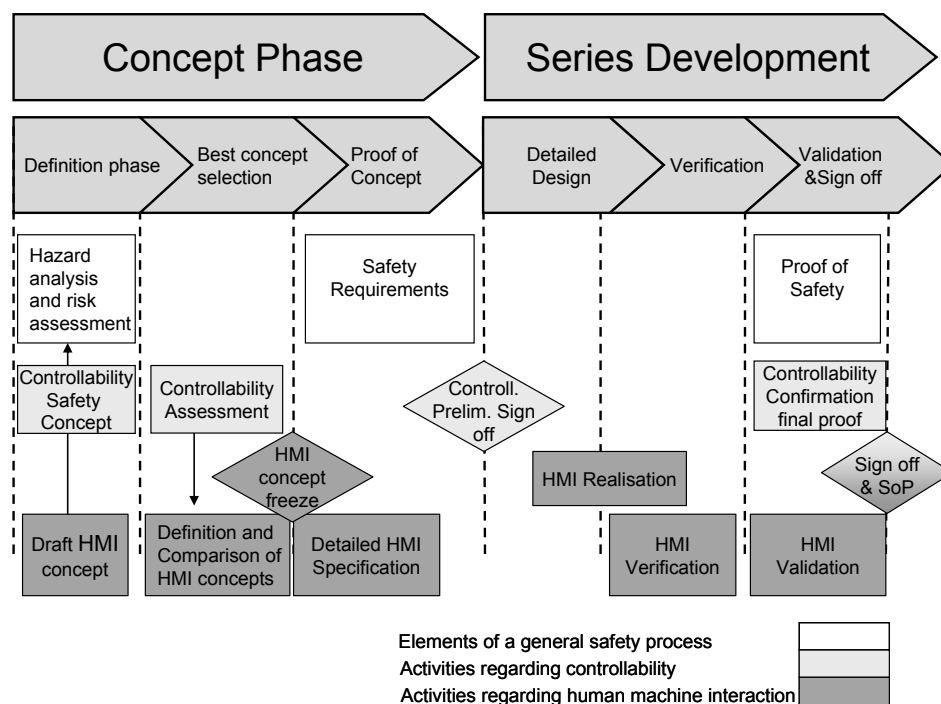


Abbildung 3-1: Durch Code of Practice definierter Entwicklungsprozess für Fahrerassistenzsysteme [PRE06].

Zentraler Aspekt des Code of Practice ist die Gewährleistung der Kontrollierbarkeit durch den Fahrer. Die Kontrollierbarkeit definiert der Code of Practice dabei als „likelihood that the driver can cope with driving situations including ADAS-assisted driving, system limits and system failures“ [PRE06]. Es gilt nachzuweisen, dass der Fahrer stets in der Lage ist, das Fahrzeug sicher zu kontrollieren, sowohl innerhalb des definierten Funktionsbereiches eines Assistenzsystems als auch im Bereich von Systemgrenzen und -übergängen sowie bei Fehlfunktionen des Systems. Zur finalen Prüfung dieses Aspekts schlägt der Code of Practice alternative Ansätze vor. Als eine Möglichkeit wird die Testung von mindestens 20 „naiven“

Versuchspersonen genannt. Dieses Vorgehen bezeichnet der Code of Practice als vorteilhaft, da im Vergleich zu alternativ vorgeschlagenen Methoden von einer höheren ökologischen Validität⁸ auszugehen ist. Daneben ist eine Absicherung auch über ein Urteil unabhängiger Experten aus verschiedenen Bereichen oder über die Einschätzung professioneller Testfahrer möglich. Zulässig sind daneben Simulationstools und Fahrsimulatoren. Die vier zuletzt genannten alternativen Ansätze sind in der Durchführung weniger aufwendig und besitzen ihre besondere Berechtigung, sofern eine gefahrlose Untersuchung mit Normalfahrern nicht möglich ist.

In Anlehnung an den Code of Practice ist somit für die in dieser Arbeit untersuchten Eingriffe in die Lenkung über gerichtete Zusatzmomente zu zeigen, dass der Fahrer stets in der Lage ist, diese zu übersteuern und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen. Dabei ist in unterschiedlichen, geeigneten Situationen zu zeigen, dass die sensorischen, kognitiven und motorischen Fertigkeiten und Fähigkeiten des Fahrers ausreichen, das Fahrzeug bei Aufschalten eines Zusatzmoments sicher zu kontrollieren. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der Identifikation einer geeigneten Testsituation. Die zu testenden Fahrsituationen sollen dabei die Bandbreite der Anforderungen der Fahrsituationen im Straßenverkehr abbilden können. Aus den vielen möglichen Situationen sind worst-case Szenarien zu identifizieren und speziell zu testen. Auf diesen Aspekt des Code of Practice für die Absicherung der Kontrollierbarkeit von Zusatzlenkmomenten wird im folgenden Abschnitt eingegangen. Daneben sind die Fertigkeiten und Fähigkeiten des Fahrers zentraler Gegenstand der Betrachtung in dieser Arbeit. Auch hier gilt es, die Bandbreite normaler Autofahrer abzudecken und den Vorgaben des Code of Practice zu genügen. Die Forderung, dass auch für Subpopulationen schwächerer Fahrer Kontrollierbarkeit in allen Situationen gewährleistet ist, wird in Abschnitt 3.2.1 diskutiert.

3.2 Vorgehen zur Beschreibung der Auswirkungen von Lenkungseingriffen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Bevor eine experimentelle Betrachtung der Auswirkungen von Zusatzlenkmomenten mit Normalfahrern auf die Fahrer-Fahrzeug Interaktion geleistet werden kann, sind methodische Ansätze zu klären, mit deren Hilfe eine solche Betrachtung ermöglicht wird. Allem voran sind Kriterien zu definieren, die eine Bewertung der Auswirkungen der zusätzlich zu applizierenden Lenkmomente auf das Fahrer-Fahrzeug-System erlauben. Im folgenden Abschnitt wird die Eignung unterschiedlicher Parameter vor diesem Hintergrund diskutiert. Daraus abgeleitet ergibt sich ein methodisches Vorgehen zur experimentellen Betrachtung der Auswirkungen von haptischen Signalen in Form von Zusatzlenkmomenten auf das Fahrverhalten von Normalfahrern.

⁸ Die ökologische Validität als Aspekt der externen Validität beschreibt die Übertragbarkeit und Gültigkeit von experimentellen Ergebnissen auf die natürliche Umwelt [AME94]. So ist gerade bei hoher Standardisierung in Experimenten und Reduktion der Komplexität die Frage zu stellen, inwieweit das experimentelle Setting die Realität noch repräsentiert. In dem hier aufgeführten Kontext ist davon auszugehen, dass eine Testung mit normalen Fahrern im Realfahrzeug die Realsituation bei Einsatz eines Fahrerassistenzsystems besser abbildet, als z.B. eine Expertenbeurteilung oder eine Studie im Fahrsimulator.

3.2.1 Auswahlkriterien der zu untersuchenden Stichprobe

Besonders zu berücksichtigen sind laut Code of Practice potentiell schwächere oder stärker gefährdete Subpopulationen. Aus Unfallanalysen [Sta08; Sch93a] geht hervor, dass das Risiko Verursacher eines Unfalls zu sein, einerseits im Alter über 65 Jahre und andererseits besonders bei jungen Fahrern unter 25 Jahre überdurchschnittlich hoch ist. Abbildung 3-2 zeigt das Risiko der Unfallverursachung in Abhängigkeit vom Alter. Bei älteren Fahrern sind Einbußen in der Sehfähigkeit, Motorik und der Informationsverarbeitungsleistung als Gründe anzuführen, wobei große interindividuelle Unterschiede zu beobachten sind [TRA94; HUK94; SS00]. In der Regel können ältere Fahrer viele dieser Leistungsminderungen durch eine angepasste Fahrweise kompensieren [TRA94; HUK94]. Bei jüngeren Fahrern sind als Gründe für die erhöhte Unfallverursachung mangelnde Fahrerfahrung und eine hohe Risikobereitschaft anzuführen [BG02; Sie99]. Als potentiell gefährdete Fahrergruppen werden in der vorliegenden Arbeit daher jüngere und ältere Fahrer berücksichtigt.

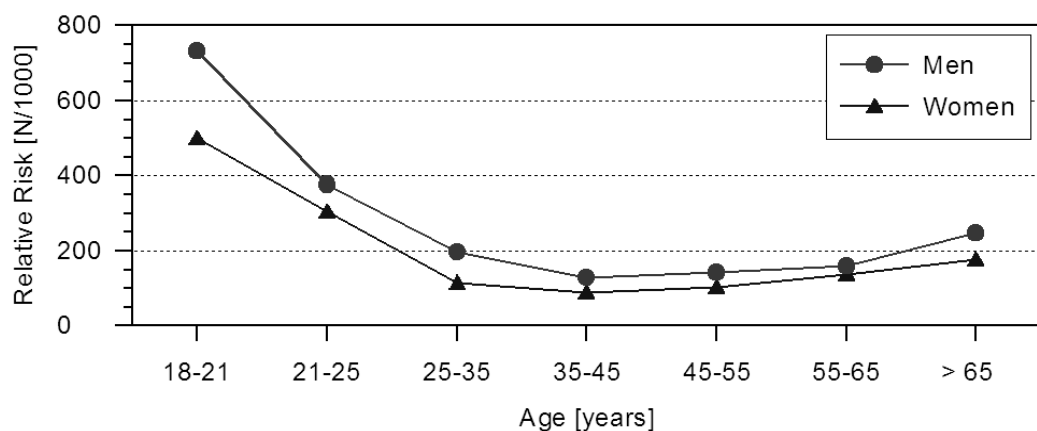


Abbildung 3-2: Fahrleistungsbezogenes Risiko der Unfallverursachung Pkw/Pkw-Unfälle von 1000 Personen pro 1 Million Fahrkilometer [HUK94, S. 43].

Als ein zentraler Aspekt steht in dieser Arbeit die Untersuchung von potentiell schwächeren Fahrergruppen im Vordergrund. Sollte sich zeigen, dass die Zusatzmomente bei potentiell schwächeren Fahrergruppen, wie Fahranfängern mit wenig Fahrerfahrung und älteren Fahrern, zu anderen Ergebnissen führen als bei Fahrern mittleren Alters, so sind diese in weiteren Untersuchungen besonders zu berücksichtigen. Hierzu werden Subpopulationen unterschiedlichen Alters mit Zusatzlenkmomenten unterschiedlicher Amplituden konfrontiert und die Auswirkungen auf Fahrer und Fahrzeug erfasst.

3.2.2 Anforderungen an die Fahrmanöver

Für die Untersuchung von Normalfahrern muss ein fahrdynamischer Leistungsbereich realisiert werden, der das Fahrverhalten im realen Verkehr in einem weiten Bereich abdeckt. Dies betrifft einerseits Fahrmanöver mit den dazugehörigen Aufgaben und andererseits die zu testenden Zusatzlenkmomente. Im Hinblick auf die Absicherung der Kontrollierbarkeit von Eingriffen über zusätzliche Lenkmomente gilt es, Testsituationen zu ermitteln, die eine sinnvolle Bestimmung zumutbarer Eingriffe und deren Absicherung mit normalen Fahrern erlauben. Bei der Definition der zu untersuchenden Bereiche ist der Bezug zu im Realverkehr beobachtbaren Rahmenbedingungen herzustellen. Zusätzlich müssen straßenbauliche Anforderungen und Richtlinien in die Vorauswahl einbezogen werden. Dies gilt insbesondere für

die Fahrmanöver. Die Untersuchung erfordert weiter, dass die Fahrmanöver möglichst kontrolliert und replizierbar realisiert werden.

So ist denkbar, dass die Auswirkungen dieser Signale auf Fahrerwahrnehmung und -reaktion in Abhängigkeit der Ausgangslage des Lenkmoments z.B. durch Kurvenfahrt moderiert werden. Daher werden Fahrmanöver identifiziert, die den Leistungsbereich des Normalfahrers abdecken und den genannten Anforderung der experimentellen Kontrolle entsprechen. Zu nennen sind z.B. Geradeausfahrt auf gerader Strecke mit normaler Spurbreite, Geradeausfahrt in stark verengter Spurbreite [RSA07], Kurvenfahrt bei unterschiedlichen Radien und ISO-Spurwechsel [ISO99] als dynamisches Manöver mit starker Lenkaktivität. Innerhalb dieses Vorhabens gilt es, die Eignung dieser Fahrmanöver experimentell zu bestimmen (Kapitel 4.1).

3.2.3 Ansätze zur Bewertung der Kontrollierbarkeit

Prinzipiell bieten sich für die Messung der Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente mehrere Verfahren an:

Güte der Aufgabenbewältigung

Für die Fahraufgabe werden Kriterien definiert, die ein erfolgreiches Bewältigen derselben kennzeichnen. Hinsichtlich der in dieser Arbeit betrachteten Zusatzlenkmomente bieten sich Maße der Spurhaltung an. Sofern eine befriedigende Messtechnik hierfür nicht zur Verfügung steht, kann auf das Kriterium von Pylonenfehlern zurückgegriffen werden. Problematisch ist jedoch, dass ein Zusatzmoment abhängig von der Ausgangsposition des Fahrzeugs mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zu einem Pylonenfehler führt. Gleichzeitig werden die Bewegungen innerhalb der Spur nicht weiter unterschieden. Daher ist dieses Maß wenig spezifisch und stellt lediglich ein extremes Randkriterium bei der Bewertung dar.

Bedienaktivität des Fahrers und resultierende fahrdynamische Größen

Eine umfassendere Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Systems wird durch die Betrachtung von Parametern der Fahrzeugbedienung und der Fahrzeugreaktion ermöglicht. Im Vordergrund stehen die Bedieneingaben des Fahrers am Lenkrad. Dabei ist davon auszugehen, dass der Fahrer dabei nicht auf eine initiale Anregung reagiert, sondern seine Bedieneingaben aufgrund von fahrphysikalischen Zustandsänderungen des Fahrzeugs oder von Kursabweichungen regelt. Für die Analyse dieser Parameter ist daher eine prozessorientierte Betrachtung notwendig, bei der die Störungsauswirkungen über den Zeitverlauf betrachtet werden.

Psychophysiologische Maße und subjektive Beanspruchung

Die Idee dieser Verfahren ist, den Aufwand abzuschätzen, den der Fahrer zur Bewältigung der Fahraufgabe erbringen muss. Allerdings bilden diese Maße insbesondere bei sehr kurzen Fahraufgaben lediglich die Schwierigkeit der Fahraufgabe ab und eignen sich nur eingeschränkt zur Betrachtung von Unterschieden. Gleichzeitig erschwert die hohe Variabilität der physiologischen Maße eine Trennung der Varianzquellen Fahrmanöver und Störungsauswirkung. Aus diesen Gründen wird von einer Erhebung psychophysiologischer Daten bei den Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Sinne einer ökonomischen Durchführung abgesehen.

Subjektive Beurteilungen

Im Bereich der Fahrzeugbewertung werden meist mehrdimensionale Beurteilungsverfahren eingesetzt. Diese Instrumentarien zur Beurteilung von Fahrverhaltenseigenschaften [siehe Zom91; Bus03] werden in der Regel speziell für die Fragestellung der Untersuchung entwickelt und sind damit mit einer mangelnden Standardisierung verbunden. So erlauben die speziellen Verfahren keinen Vergleich zwischen verschiedenen Untersuchungen und liefern meist nur Bewertungen in Bezug auf einen speziellen Standardreiz, beispielsweise in Form einer Basisvariante einer Fahrwerksauslegung. Kritisch anzumerken ist daneben, dass die Mehrzahl der Bewertungsinstrumentarien vom Fahrer eine Bewertung der Fahrzeugvariante abverlangt, statt von ihm die Bewertung einer absolvierten Situation einzufordern.

3.2.4 Die Störungsbewertungsskala

Die dargestellten Ansätze sind wegen ihrer unterschiedlichen Sensitivität und Spezifität lediglich eingeschränkt brauchbar. Um entsprechend der Zielsetzung dieser Studie Aussagen zur Relevanz in Bezug auf das Sicherheitsempfinden und die Beurteilung des Fahrzeugverhaltens durch den Normalfahrer zu gewinnen, wird die von [NK03] entwickelte Störungsbewertungsskala eingesetzt (Abbildung 3-3). Diese Skala und das mit ihr verbundene Vorgehen hat sich bereits bei der Bewertung der Auswirkungen von Störungen im Lenkungsstrang [NK03; GSN+05] oder durch Fahrbahnunebenheiten [SSN+06] als geeignet erwiesen. Sie leistet eine absolute Bewertung der Störungsauswirkungen auf das System Fahrer-Fahrzeug. Weiterhin stellt sie ein Verfahren dar, das den Anforderungen des Fahrversuchs an leichte Handhabbarkeit gerecht wird: Ein besonderes technisches Verständnis wird nicht vorausgesetzt, was bei der Beurteilung fahrdynamischer Störungen durch Normalfahrer eine weitere wichtige Voraussetzung darstellt.

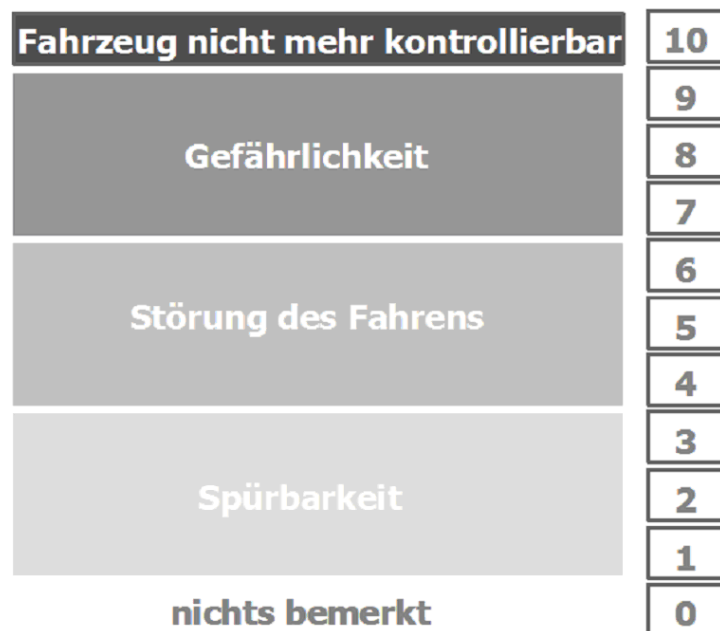


Abbildung 3-3: Skala zur Bewertung der Lenksystemstörungen [NK03].

Die Skala ist nach dem Prinzip einer Kategorienunterteilungsskala [Hel85] aufgebaut und unterscheidet fünf Bereiche der Störungsauswirkung: „nichts bemerkt“, „Spürbarkeit“, „Störung des Fahrens“, „Gefährlichkeit“, „Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar“. Während die untere und obere Randkategorie nicht weiter zu differenzieren ist, werden die drei mittleren

Kategorien weiter in je drei Stufen aufgeteilt. Insgesamt ergibt sich daraus eine 11-stufige Skala, die in einem zweistufigen Vorgehen zu verwenden ist. Zuerst erfolgt die Benennung der Verbalkategorie, um in einem zweiten Schritt dann eine Feindifferenzierung vorzunehmen. In die Kategorie „Spürbarkeit“ fallen Störungen, die vom Probanden bemerkt werden. Allerdings ist kein kompensatorisches Handeln erforderlich. Die Kategorie „Störung des Fahrens“ betrifft Störungen, die wegen auftretender Abweichungen einen deutlichen, aber vom Probanden als vertretbar bewerteten kompensatorischen Aufwand erfordern. Eine Störung wird als „gefährlich“ eingestuft, wenn der Aufwand zur Kompensation der Störung hoch und nicht mehr tolerierbar ist. Aus der Störung können sicherheitskritische Situationen entstehen [NK03].

Zur Minimierung von Gedächtniseffekten erfolgt die Beurteilung unmittelbar im Anschluss an die Störungsaufschaltung. Die erste Aufschaltung einer Störung erfolgt ohne Vorinformation der Versuchsperson. Erst dann werden die Fahrer mit der Skala vertraut gemacht und ausführlich instruiert. Ein wesentlicher Punkt der Instruktion bezieht sich auf die Aufforderung, eine kritische Urteilshaltung einzunehmen und die Störungsauswirkungen immer mit Bezug auf reale Verkehrssituationen zu bewerten [NK03].

3.2.5 Zusammenfassung

Aus den Betrachtungen lässt sich ableiten, dass für eine Untersuchung auf Seiten des Fahrmanövers möglichst standardisierte Fahrsituationen abzuleiten sind, die die Rahmenbedingungen des Straßenverkehrs berücksichtigen und das Spektrum des in der Realität vom Normalfahrer gefahrenen Bereiches der Fahrdynamik abdeckt. Hinsichtlich der Evaluation der Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente erscheinen traditionelle Zugänge der Operationalisierung weitgehend ungeeignet. So liefern gängige Verfahren der subjektiven Bewertung keine absolute Bewertung der Auswirkungen eines fahrdynamischen Eingriffs. Weiter ist eine unzureichende Standardisierung zu bemängeln. Auch die vielfach verwendeten psychophysiologischen Ansätze erscheinen für die Anforderungen dieses Vorhabens und den Einsatz im Realfahrzeug ungeeignet und werden aus Gründen einer ökonomischen Durchführung in den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht eingesetzt.

Als ein sinnvolles und für den Normalfahrer handhabbares Instrument hat sich die Störungsbewertungsskala erwiesen, die eine absolute Einstufung einer Fahrzeuganregung erlaubt. Untermauert wird diese Methode durch gleichzeitige Betrachtung von Bedienparametern des Fahrers und den resultierenden Fahrzeugreaktionen. Zwar kann generell davon ausgegangen werden, dass eine stärkere resultierende Fahrzeugreaktion nicht als wünschenswerter angesehen werden kann. Allerdings fehlen hier Kriterien, die eine absolute Einstufung der Kritikalität außerhalb des fahrphysikalischen Grenzbereiches erlauben. Als extremes Randkriterium können ferner Spurverletzungen hinzugezogen werden. Diese Betrachtung auf mehreren Ebenen wird als sehr wesentlich erachtet, um die jeweiligen Kriterien gegenseitig zu prüfen und zu untermauern.

3.3 Beschreibung der durchgeführten Studien

Aus den Überlegungen zur Testmethodik werden konkrete Studiendesigns für im Realfahrzeug abgeleitet und das Versuchsdesign der durchgeführten Probandenstudien beschrieben. Ergänzt werden die Realfahrzeugstudien durch eine weitere im Fahrsimulator. Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden damit mehrere experimentelle Studien durchgeführt. Da die Studien jeweils unterschiedliche Aspekte dieses Vorhabens gleichzeitig betrachten und damit z.T. überlappend oder auch im Sinne einer Validierung gestaltet werden, beziehen sich die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse wechselseitig auf die Studien. Zur besseren Orientierung wird das Design der Versuche in diesem Abschnitt dargestellt und im folgenden Kapitel 4 bei der Ergebnisdarstellung auf die jeweilige Versuchsbeschreibung Bezug genommen. Insgesamt wurde vier Studien durchgeführt, davon eine im statischen Fahrsimulator und drei in unterschiedlichen Realfahrzeugen auf dem Volkswagen Testgelände in Ehra-Lessien. Abbildung 3-5 liefert einen Überblick über die durchgeführten Studien mit den jeweils variierten Faktoren. Die grau hinterlegten Felder zeigen die pro Hauptfragestellung betrachteten Studien. Der Aufbau des Ergebnisteils dieser Arbeit (Kapitel 4) folgt den Hauptfragestellungen, die in den jeweiligen Unterabschnitten behandelt werden.

	Studie 1 Signalparameter & situative Faktoren	Studie 2 Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	Studie 3 Fahrsituation & Alterseffekte	Studie 4 Replikation & Validierung
Kapitel 4.1 Einfluss des Fahrmanövers	Gerade Kurve	Gerade	Engstelle Kurve Spurwechsel	Engstelle Kurve Spurwechsel
Kapitel 4.2 Vergleich verschiedener Fahrergruppen	Jüngere Fahrer Normalfahrer	Normalfahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer
Kapitel 4.3 Situative Faktoren & Fahrzeugparameter	Geschwindigkeit Spurführungssystem Fahrzeuge A & B	Simulatormodell	Fahrzeug C	Fahrzeug C
Kapitel 4.4 Variation der Signalparameter	Amplitude Steilheit	Amplitude Steilheit	Amplitude	Steilheit

Abbildung 3-4: Übersicht der durchgeführten Studien mit den jeweils variierten Faktoren und der Hauptfragestellungen mit Kapitelangabe. Die pro Fragestellung betrachteten Studien sind grau hinterlegt dargestellt.

3.3.1 Studie 1: Signalparameter und situative Variationen

Die erste hier beschriebene Studie versucht aus der Literatur bekannte und in Vorstudien identifizierte Einflussfaktoren abzudecken und deren Einfluss auf Wahrnehmung und Reaktion bei Normalfahrern zu bestimmen. Aufgrund der Vielzahl der behandelten Einflussparameter (Amplitude, Signalform, Fahrsituation, Geschwindigkeit, Spurführungsassistenz und Fahrzeugabstimmung) werden in dieser Studie nicht vollständig alle Versuchsbedingungen gegeneinander getestet, sondern im Sinne eines genesteten Designs einzelne Abstufungen verglichen. Identifizierte, wesentliche Faktoren sollen in weiteren Studien repliziert und präzisiert werden. Die Studie wird im Realfahrzeug durchgeführt.

Versuchsaufbau

Die Versuche wurden mit zwei Versuchsträgern der Volkswagen AG auf dem Testgelände in Ehra-Lessien mit insgesamt 18 Probanden durchgeführt. Die Forderung aus dem RESPONSE Code of Practice nach 20 Versuchsteilnehmern konnte aus organisatorischen Gründen in diesem Versuch nicht eingehalten werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Studie nicht der Absicherung eines Assistenzsystems gilt, sondern die Untersuchung der Wirkzusammenhänge bei der Aufschaltung von Zusatzmomenten zum Ziel hat. Bei den Versuchsfahrzeugen handelte es sich um zwei VW Touran, die mit einem optischen Spurerkennungssystem ausgestattet sind. Bei beiden Versuchsträgern sind Lenkungseingriffe über die elektrische Servolenkung (EPS) möglich sind und können als zusätzliche Lenkmomente appliziert werden. Variiert wurde auf Fahrzeugseite die Abstimmung von Lenkung und Spurführungssystem. Das Fahrzeug B besitzt gegenüber Fahrzeug A eine erhöhte Steifigkeit in der Lenkung bei gleichzeitig stärkeren Momenteneingriffen des Spurführungssystems. Der Versuchsleiter begleitete den Versuch auf dem Beifahrersitz des Fahrzeugs und löste die Zusatzmomente für den Probanden nicht sichtbar aus.

Die Zusatzmomente wurden auf den Geraden und in einer Kurve ($r=377\text{m}$) der Schnellbahn des Versuchsgeländes in Ehra-Lessien zugeschaltet (Abbildung 3-5). Die Probanden wurden instruiert, die Strecke auf der rechten Spur zu befahren. Die Geschwindigkeit wurde über die Geschwindigkeitsregelanlage des Fahrzeugs auf 70 bzw. 100km/h eingeregelt. Aufgabe der Probanden war es, das Fahrzeug möglichst präzise in der Mitte der Spur zu halten und Störungen auszuregeln.

Versuchsdesign

Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der Bedingungen der dargestellten Lenkmomente. Es handelt sich um einen vollständig abhängigen Versuchsplan, so dass jede Versuchsperson alle Bedingungen in vier Blöcken absolvierte. Die Blöcke wurden durch die Kombination von Fahrzeug, Geschwindigkeitsstufe und Status der Spurführungsassistenz gebildet und den Versuchspersonen pro Fahrzeug im cross-over Design dargeboten. Innerhalb der Blöcke wurden unterschiedliche Zusatzmomente der Form Sprung und Rampe dargeboten. Die Zusatzmomente wurden in beide Richtungen nach links und rechts dargeboten und dreimal wiederholt gestellt. Die Reihenfolge der Darbietung wurde vollständig randomisiert. Als Einschränkung dieser Bedingung galt lediglich, dass die jeweils größten Amplituden in den Situationen nicht als erste Zusatzmomente dargeboten wurden. Die Zusatzmomente mit Amplitude 0 wurden im Sinne einer Baseline Messung in den Ablauf integriert. Hier wurden keine Zusatzmomente aufgeschaltet, sondern lediglich eine Messung in der jeweiligen Situation ausgelöst.

Fahrzeug-abstimmung	Spurführungs-system	Ausgangs-geschwindigkeit	Fahrsituation	Form des Zusatzmoments	Amplituden-stufen
A	Nicht aktiv	100km/h	Gerade	Sprung	0; 2; 3; 4
				Rampe	3; 4; 5
	Aktiv	100km/h	Gerade	Sprung	0; 2; 3; 4
				Rampe	3; 4; 5
B	Aktiv	70km/h	Gerade	Sprung	0; 2; 3; 4
			Kurve	Sprung	0
		100km/h	Gerade	Sprung	0; 2; 3; 4
			Kurve	Sprung	0

Tabelle 3-1: Bedingungen und Amplituden der dargestellten Zusatzlenkmomente.



Abbildung 3-5: Versuchsfahrzeug und schematischer Aufbau des Fahrparcours.

Die Zusatzmomente sind in Abbildung 3-6 im zeitlichen Verlauf dargestellt. Demnach wird nach Aufbau des vollen Zusatzmomentes dieses bis 2s nach Auslösung gehalten. Die Rücknahme erfolgt sehr langsam über einen Zeitraum von 5s, um den Fahrer bei der Rücknahme nicht erneut mit einem schnellen Wechsel zu konfrontieren. Die vom Fahrer verlangte Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments soll ausschließlich hinsichtlich des ersten Wechsels erfolgen. Die Sollvorgabe im Lenkmoment führt dabei zunächst zu einem Anstieg im Ist-Moment. Sobald Reibung und Trägheit in der Lenkung durch das Moment überwunden werden, verlangsamt sich der weitere Aufbau im Ist-Moment, da das angeforderte Moment in eine Lenkradbewegung umgesetzt wird. Dies zeigt sich im Anstieg des Lenkradwinkels. Im Weiteren wird der Aufbau des Ist-Lenkmoments durch den Eingriff des Fahrers und die durch ihn eingebrachten Kräfte moderiert.

Während der Versuche wurden neben fahrphysikalischen Parametern und Lenkeingaben des Fahrers die applizierten Zusatzmomente über den Fahrzeug-CAN aufgezeichnet. Zusätzlich wurden über eine Kamera mit integrierter Bildverarbeitung Fahrzeugposition in der Spur, Spurbreite und Krümmung aufgezeichnet. In der Hauptsache wurden Zusatzmomente bei nicht aktiviertem Spurführungssystem aufgeschaltet. Bei aktivierter Spurführung wurde das Fahrzeug durch spurpositionsabhängige Lenkeingriffe automatisch in der Spurmitte geführt. Abbildung 3-6 (rechts) zeigt einen beispielhaften Verlauf des Lenkmoments vor Aufschaltung des Zusatzmoments. Mit der Aufschaltung des Zusatzmoments wird das Spurführungssystem deaktiviert.

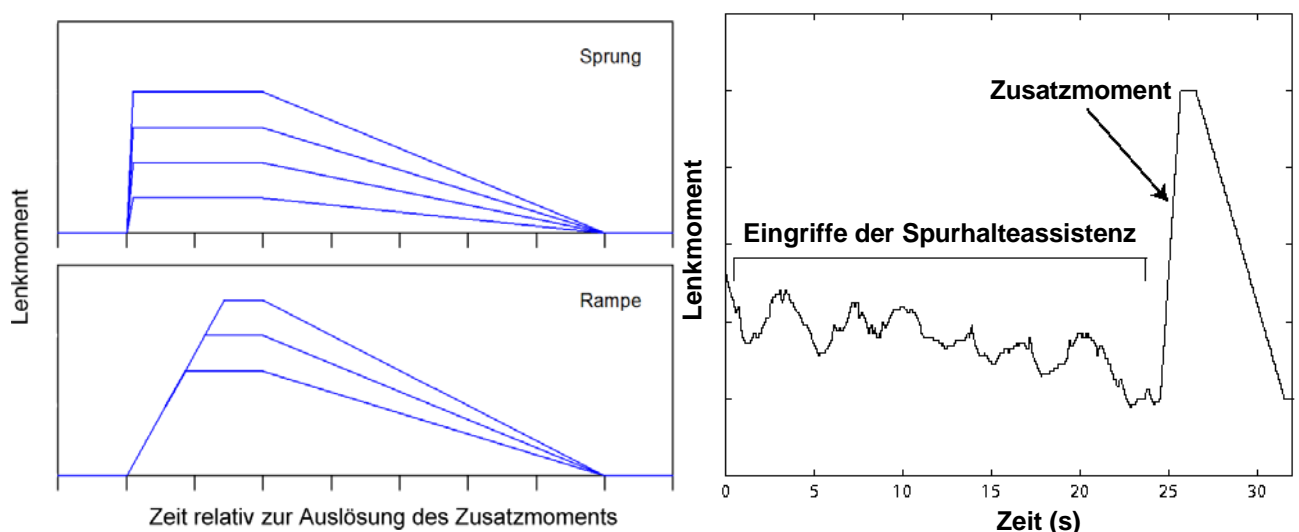


Abbildung 3-6: Zeitlicher Verlauf der Zusatzmomente für die Bedingung Sprung (links oben) und Rampe (links unten) und beispielhafter Verlauf des Lenkmoments bei Spurführungssystem vor Aufschaltung eines Zusatzmoments (links).

Die Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente erfolgte mit Hilfe der Störungsbewertungsskala [NK03]. Aufbau und Vorgehen der Störungsbewertungsskala ist in Abschnitt 3.2.4 beschrieben. Die Störungsbewertungsskala versucht, nicht nur Unterschiede zwischen verschiedenen Anregungen abzubilden, sondern auch die Frage zu beantworten, wie der Fahrer die Störungsauswirkungen absolut im Hinblick auf die Fahrsicherheit bewertet. Dies ist umso wesentlicher, als allgemeine objektive Maßstäbe für die Beschreibung der Sicherheitsrelevanz der hier untersuchten Anregungen auf das Fahrzeug nicht vorliegen. Die Probanden werden direkt nach Abschluss des Lenkmomentsignals zu einem Urteil aufgefordert.

Untersuchte Stichprobe

Die Versuchsteilnehmer sind Mitarbeiter der Volkswagen AG aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen. Keiner der Teilnehmer besitzt Erfahrungen mit Spurführungsassistenten und ist im Bereich der Systementwicklung tätig. Die Gruppe der älteren Versuchsteilnehmer besteht aus 2 Frauen und 6 Männern. Das mittlere Alter liegt bei 58.3 Jahren ($sd = 3.5$ Jahre). In der Gruppe der jüngeren Teilnehmer sind 10 Männer mit einem durchschnittlichen Alter von 31.4 Jahren ($sd = 3.1$ Jahre).

Messgrößen und Datenaufbereitung

In die Analysen gehen 1172 Messungen ein. Die aufgezeichneten fahrphysikalischen Daten werden gefiltert (5Hz Low Pass) und offsetkorrigiert. Aus den Verlaufsdaten der Momentaufschaltungen werden verschiedene Kennwerte berechnet. Zu nennen sind Extrema der Lenk- und Fahrzeugreaktionen nach Aufschaltung des Zusatzmoments. Die betrachteten Parameter sind Lenkwinkel, -geschwindigkeit, Lenkmoment, Gierrate, Querbeschleunigung und Querabweichung.

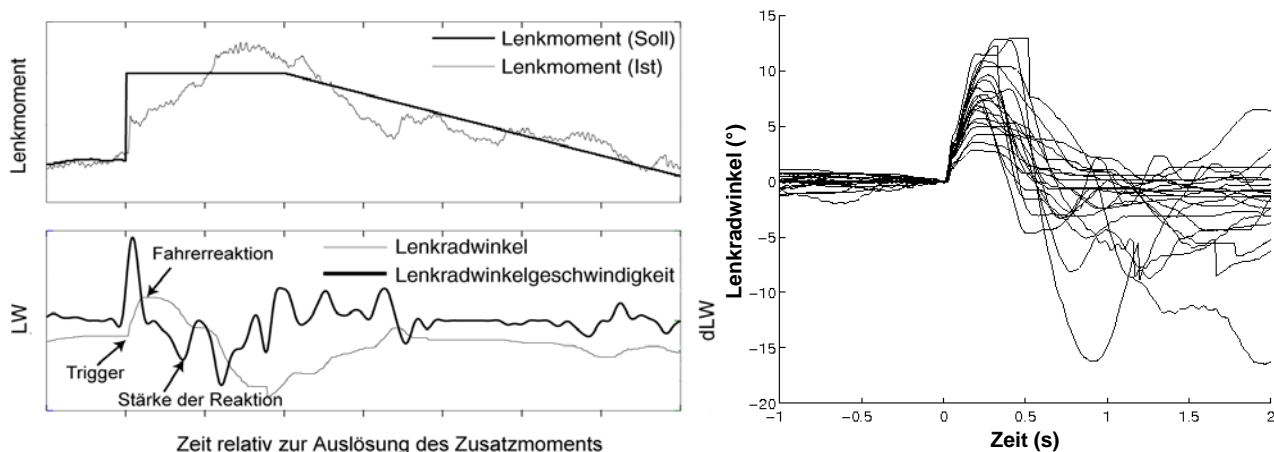


Abbildung 3-7: Appliziertes und tatsächliches Lenkmoment und die Verläufe von Lenkradwinkel (LW) und -geschwindigkeit (dlw) (links). Beispielhafter Zeitverlauf des Lenkwinkels bei mehreren Einzelmessungen mit gleichem Zusatzlenkmoment.

Weiterhin werden als Maße für die Fahrerreaktion das erste relative Maximum des Lenkradwinkels und der Zeitpunkt desselben bestimmt. Dieser Punkt kennzeichnet den aktiven Eingriff des Fahrers (Abbildung 3-7 links). Die maximale Lenkradgeschwindigkeit nach dem ersten Maximum des Lenkradwinkels wird als Kennwert für die Stärke der Fahrerreaktion herangezogen. Für die fahrphysikalischen Parameter Gierreaktion und Querbeschleunigung werden das relative Maximum und das relative Minimum im Zeitraum von Störungsaufschaltung bis zwei Sekunden nach Auslösung identifiziert. Da nicht das Niveau, sondern vielmehr

die Änderung dieser Parameter für den Fahrer relevant ist, wird aus den beiden Extrema die Spannweite als deren Differenz berechnet (Abbildung 3-8).

Die ermittelten Kennwerte werden mit den subjektiven Bewertungen in Zusammenhang gebracht. Für die wiederholten Störungen gehen dabei die gemittelten Werte in die Analysen ein. In den Auswertungsgrafiken in den Kapiteln 4 und 5 wird neben Mittelwerten die Standardabweichung als Streuungsmaß dargestellt. Aufgrund der Datenstruktur werden für statistische Analysen ANOVAs mit Messwiederholung (Split-Plot Design) angewendet. Die Ergebnisse der jeweiligen Varianzanalysen sind unter den entsprechenden Abbildungen dargestellt. Aufgeführt ist neben Freiheitsgrad, F-Wert und p-Wert des jeweiligen Faktors mit η^2 ein Schätzer für die Effektstärke. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha=5\%$.

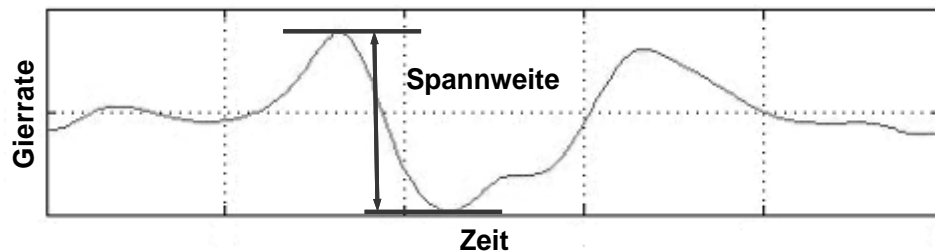


Abbildung 3-8: Spannweite der Gierrate nach Aufschaltung eines Zusatzlenkmoments

3.3.2 Studie 2: Einfluss der Anstiegsteilheit des Zusatzmoments

In dieser Studie steht die Überprüfung und genauere Untersuchung der Signalparameter Amplitude und Anstiegsteilheit eines Zusatzmoments im Vordergrund. Aufgrund der ökonomischeren Durchführungsbedingung wurde diese Studie im statischen Fahrsimulator durchgeführt.

Versuchsaufbau: Fahrsimulator, Training und Fahraufgabe

Die Studie wurde in einem Fahrsimulator ohne Bewegungssystem im Dynamics Design Lab am Department of Mechanical Engineering der Stanford University durchgeführt (Abbildung 3-9). Das Mock-up des Simulators besteht aus dem vorderen Teil eines Ford Mustang GT, der aus Platzgründen hinter der B-Säule abgetrennt wurde. Ein Großteil der Anzeigen und Bedieneinrichtungen im Fahrzeugcockpit und des Kombiinstrumentes sind voll funktionsfähig. Eine angemessene Kraftrückmeldung im Lenkrad und in den Pedalen wird über einen direct drive Gleichstrommotor bzw. durch eine Vakuumpumpe gewährleistet. Es gibt keine kinästhetische Rückmeldung der Fahrzeugbewegung; Motor- und Rollgeräusche werden simuliert und über das fahrzeugeigene Audiosystem eingespielt.



Abbildung 3-9: Fahrsimulator (links) und Darstellung während des Trainings (rechts).

Der Simulator wird mit einer Software von Systems Technology, Inc. (STI) betrieben und verfügt über drei Frontsichtkanäle mit einem Gesamtsichtfeld von 135° auf drei Leinwänden. Jede dieser Leinwände verfügt über eine Diagonale von ca. 2.7m. Die Simulation beinhaltet ferner ein komplexes, nichtlineares Fahrdynamikmodell eines Ford Taurus. Obwohl das Fahrdynamikmodell selbst bei hohen Querbeschleunigungen eine gute Abbildung der Realität liefert, ist die ökologische Validität des Simulatorsettings eingeschränkt. Nichtsdestotrotz ist dieser Versuchsaufbau insbesondere bei den geringen auftretenden Querbeschleunigungen in diesem Experiment als ausreichend realistisch und valide einzustufen, wie die Ergebnisse von [GSN+05] und [SSK+07b] unterstreichen.

In diesem Experiment besteht die Grundaufgabe des Fahrers darin, auf einer zweispurigen Straße (Spurbreite 3.66m bzw. 12ft) mit Gegenverkehr zu fahren. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird über eine Geschwindigkeitsregelanlage auf 105km/h (65mph) gehalten. Der Fahrer ist damit ausschließlich mit der Regelung der lateralen Position des Fahrzeugs betraut. Innerhalb dieser Aufgabe werden Signale in Form zusätzlicher Lenkmomente aufgeschaltet. Um das Fahrzeug in der Spur zu halten, muss der Fahrer die Auswirkungen dieser Zusatzmomente auf den Fahrzeugzustand kompensieren. Das Experiment wird von einem Versuchsleiter im gleichen Raum außerhalb des Sichtfeldes des Probanden durchgeführt und begleitet.

In einer Trainingsphase über ca. 40 Minuten wurden die Versuchsteilnehmer in mehreren Fahrten mit dem Simulator vertraut gemacht. Innerhalb dieser Fahrten wurden die Teilnehmer in unterschiedlichen Aspekten der Simulatorumgebung wie der Fahrt auf kurvigen Straßen, Folgefahren sowie langsame und schnelle Spurwechsel trainiert. Aufgrund des langen und facettenreichen Trainings kann angenommen werden, dass die Teilnehmer gut mit dem Simulator und seiner Fahrdynamik vertraut waren. Innerhalb des Experimentes wurden den Fahrern jeweils 24 Zusatzlenkmomente dargeboten. Direkt nach jedem Signal wurden die Störungsauswirkungen vom Probanden bewertet und das nächste Signal nach 40 Sekunden aufgeschaltet.

Versuchsdesign: Variation der zusätzlichen Lenkmomentsignale

Zur Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für haptische Signale in Fahrzeugen als diskrete gerichtete Zusatzmomente in der Lenkung werden hier die beiden Faktoren Amplitude und Anstiegssteilheit (Gradient) variiert. Es werden Zusatzmomente mit drei Amplituden A, B und C dargeboten. Dabei gilt $A < B < C$. Diese Amplituden gleichen den Amplitudenstufen 2, 3 and

4 aus Studie 1. Jede dieser Amplituden wird mit den vier Gradienten I, II, III und IV gestellt (Tabelle 3-2: Übersicht über die pro Amplitude gestellten Gradienten der Lenkmomente.). Hierbei gilt $I < II < III < IV$. Gradient I gleicht dem Gradienten der rampenartig mit begrenzter Anstiegssteilheit gestellten Zusatzmomente in Studie 1 (vgl. Abschnitt 3.3.1). Gradient IV ist weniger steil als der Gradient der sprungförmigen Zusatzmomente aus dem ersten Versuch. Das Zusatzmoment wird insgesamt 2 Sekunden dargeboten und danach sehr langsam zurückgenommen, um den Fahrer nicht mit einer zweiten starken Lenkmomentänderung zu konfrontieren. Damit gleicht der prinzipielle Verlauf der Zusatzsignale den Verläufen der rampenartigen Zusatzmomente aus der Studie 1 (vgl. Abbildung 3-7 links). Insgesamt werden dem Fahrer zwölf unterschiedliche Signale je zweimal wiederholt dargeboten.

Amplitude	Richtung	Gradient
A	Links; Rechts	I; II; III; IV
B	Links; Rechts	I; II; III; IV
C	Links; Rechts	I; II; III; IV

Tabelle 3-2: Übersicht über die pro Amplitude gestellten Gradienten der Lenkmomente.

Untersuchte Stichprobe

An dieser Studie haben 20 Personen zwischen 19 und 53 Jahren teilgenommen ($m=27.6$ Jahre; $sd=7.1$ Jahre). Die jährliche Fahrleistung der Teilnehmer, die aus Studenten und Mitarbeitern der Stanford University rekrutiert wurden, betrug im Mittel 13881km ($sd=11036$). Drei Teilnehmer gaben an, Erfahrungen mit Spurverlassenswarnern oder Spurführungssystemen zu besitzen.

Messgrößen und Datenaufbereitung

Die Simulationssoftware berechnet aus den Fahrereingaben und den topografischen Gegebenheiten des virtuellen Straßenverlaufs eine Vielzahl fahrdynamischer Parameter wie Gierrate, Lenkradwinkel, Lenkradwinkelgeschwindigkeit sowie Fahrzeugposition und zeichnet diese auf. Weiterhin werden die aufgeschalteten Zusatzlenkmomente und die Auslösezeitpunkte gespeichert. Die aufgezeichneten Daten werden offset-korrigiert und analog zur Vorgehensweise in Studie 1 lokale Extrema und Umkehrpunkte der Lenk- und Fahrzeugreaktionen extrahiert. In die Auswertungen gehen 480 Messungen ein. Das erste Maximum des Lenkradwinkels ist definiert als erstes Maximum in Richtung des Lenkmoments. Sowohl Amplitude als auch die Zeit werden extrahiert. Dieses Maximum beschreibt den ersten Eingriff des Fahrers und der Zeitpunkt dient als ein Schätzer für seine Reaktionszeit. Die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach diesem ersten Maximum im Lenkradwinkel wird als Kennwert für die Heftigkeit der Fahrerreaktion herangezogen (Abbildung 3-10 links). Die maximale Spannweite der Gierrate ist definiert als Differenz zwischen maximaler und minimaler Gierrate innerhalb zwei Sekunden nach Aufschaltung des Zusatzmomentes.

Direkt nach der Aufschaltung des Zusatzmomentes bewerten die Versuchsteilnehmer das Ausmaß der Störung durch das Zusatzmoment mit Hilfe einer englischen Übersetzung der Störungsbewertungsskala (vgl. Abbildung 3-10 rechts). Für eine genauere Beschreibung der Skala sei auf Abschnitt 3.2.4 verwiesen.

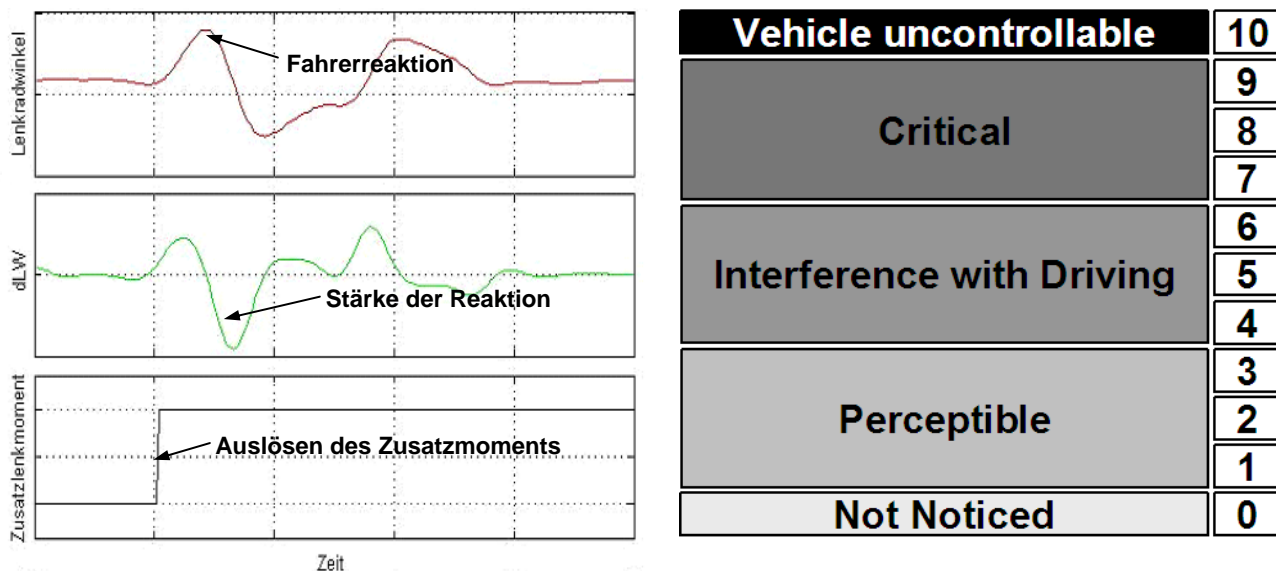


Abbildung 3-10: Zeitlicher Verlauf von Soll-Zusatzmoment, Lenkradwinkel und -geschwindigkeit (links). Störungsbewertungsskala [NK03] (rechts).

Aufgrund des experimentellen Designs werden die statistischen Analysen mit Hilfe von ANOVAs mit Messwiederholung durchgeführt. Für post-hoc Testungen der Abstufungen der Hauptfaktoren werden Fisher LSD Tests eingesetzt. Interaktionseffekte werden weiter über T-Tests für abhängige Stichproben untersucht. Neben der Irrtumswahrscheinlichkeit p wird mit η^2 ein Schätzer für die Effektstärke angegeben.

3.3.3 Studie 3: Einfluss der Fahrsituation und Alterseffekte

In einer dritten Studie wurden Erkenntnisse aus den ersten beiden Studien im Realfahrzeug überprüft und insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Fahrsituation untersucht. Daneben wurde ein weiterer Schwerpunkt auf den Einfluss des Alters und der Fahrerfahrung auf Wahrnehmung und Reaktion bei zusätzlichen Lenkmomenten gelegt.

Versuchsaufbau: Auswahl der Fahrsituationen

In dieser Studie wurden Zusatzlenkmomente in zwei Kurven mit unterschiedlichem Radius gestellt und mit der Aufschaltung bei Geradeausfahrt verglichen. Als Worst-case der Geradeausfahrt wurde hier eine verengte Fahrbahn gewählt, die über eine 2.5m breite Pylonengasse realisiert wurde. Diese Engstelle bildet beispielsweise eine Spurverengung in einer Autobahnbaustelle ab und richtet sich in Ihren Abmessungen nach den Mindestvorgaben aus straßenbaulichen Richtlinien [RSA07]. Die Engstelle erlaubt aufgrund der Breite des eingesetzten Fahrzeugs von 1.82m nur sehr geringe Abweichungen in der Spurführung. Störungen müssen also sehr schnell und präzise vom Fahrer ausgeregelt werden.

In Ergänzung zu diesen querdynamisch (quasi-) stationären Manövern wurden die Störungsauswirkungen im dynamischen Manöver eines einfachen Fahrspurwechsels untersucht. Die Abmessungen des Spurwechsels entsprachen den ersten beiden Gassen des doppelten Fahrspurwechsels nach [ISO99] und wurden wie auch die Engstelle mit Pylonen abgesteckt. Die realisierten Fahrsituationen wurden in einem Oval in fester Abfolge durchfahren (Abbildung 3-11). Die Fahrgeschwindigkeit wurde mit Hilfe einer Geschwindigkeitsregelanlage auf konstant 80km/h eingestellt.

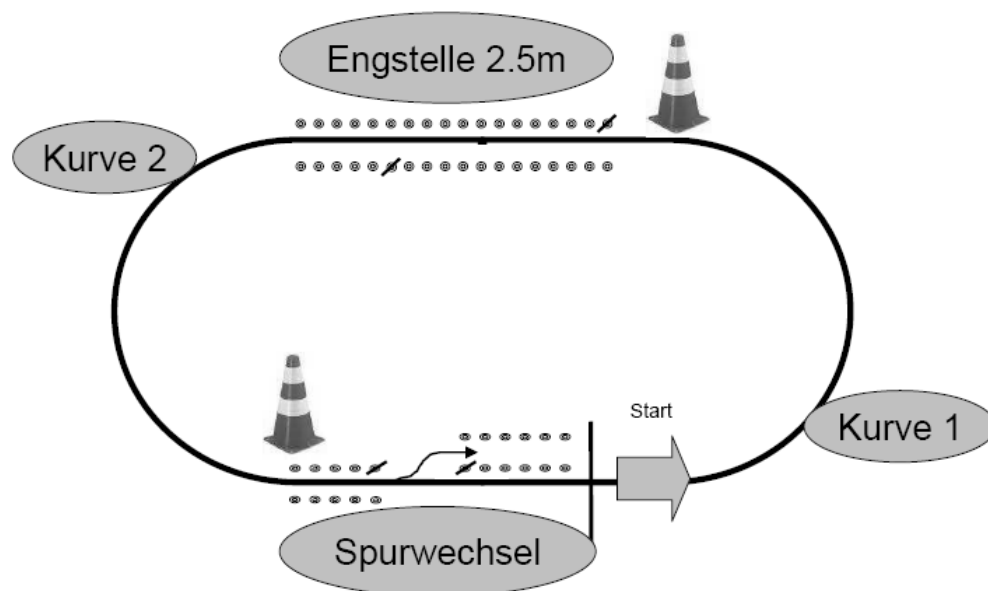


Abbildung 3-11: Realisierte Fahrsituationen innerhalb des Fahrparcours.

Im Versuch wurde ein mit Messtechnik ausgestatteter VW Passat B6 eingesetzt. Bei dem Versuchsfahrzeug war es über die modifizierte Steuergerätesoftware der Elektromechanischen Servolenkung möglich, zusätzliche Lenkmomente zu applizieren. Der Versuchsleiter begleitete den Versuch auf dem Beifahrersitz und löste während der Versuchsfahrt die Zusatzlenkmomente für den Probanden nicht sichtbar aus.

Versuchsdesign: Variation der Zusatzmomente

Innerhalb der verschiedenen Fahrsituationen werden Zusatzmomente unterschiedlicher Amplitude gestellt (Tabelle 3-3). Hinsichtlich der Amplitudenstufen gilt $0 < A < B < C$. Die Zusatzmomente mit Amplitude 0 wurden im Sinne einer Baseline Messung in den Ablauf integriert. Hier wurden keine Zusatzmomente aufgeschaltet, sondern lediglich eine Messung in der jeweiligen Situation ausgelöst. Alle dargestellten Zusatzmomente wurden dreimal wiederholt. Die Reihenfolge wurde über die Versuchspersonen vollständig randomisiert.

Fahrsituation	Richtung	Amplitude
Engstelle	Links; Rechts	0; A; B; C
Kurve 1 links	Links; Rechts	0; A; B
Kurve 2 links	Links; Rechts	0; A; B
Spurwechsel Ende Gasse 1	Links	0; A; B; C
Spurwechsel Übergang 1	Rechts	0; A; B; C

Tabelle 3-3: Übersicht über die gestellten Zusatzlenkmomente.

Die Zusatzmomente werden bis ca. 2s nach Auslösung gehalten. Die Rücknahme erfolgt sehr langsam, um den Fahrer nicht erneut mit einem schnellen Wechsel zu konfrontieren (Abbildung 3-6). Die Probanden werden direkt nach Abschluss des Lenkmomentsignals zu einer Störungsbewertung aufgefordert. Die subjektive Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente erfolgte mit Hilfe der Störungsbewertungsskala [NK03]. Für eine genaue Beschreibung der Skala sei auf Kapitel 3.2.4 verwiesen.

Die Zusatzmomente werden auf gerader Strecke mit begrenzter Spurbreite (Engstelle 2.5m), in Kurven mit unterschiedlichen Radien und innerhalb verschiedener Handlungssequenzen während eines dynamischen Fahrmanövers (Spurwechsel) appliziert. Die Auslösung des Zusatzmomentes im Spurwechsel erfolgte innerhalb unterschiedlicher Fahreraktionen: Einer-

seits wurden Zusatzmomente beim Einlenken des Fahrers in den Spurwechsel am Ende der ersten Gasse aufgeschaltet. Andererseits wurde beim Initiieren des Gegenlenkens im Übergang ein Moment ausgelöst. Zu diesem Zeitpunkt, der durch einen Nulldurchgang der Lenkradwinkelgeschwindigkeit gekennzeichnet ist, leitet der Fahrer das Einlenken in die zweite Gasse ein.

Untersuchte Stichprobe

Da die Bewertung der Zusatzmomente durch Normalfahrer erfolgen soll, wurden Teilnehmer angeworben, die keine Erfahrung in der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen oder der Bewertung von Fahrzeugeigenschaften besitzen. Untersucht wurden 30 Versuchspersonen, darunter 22 Männer und 8 Frauen. Neben 17 Fahrern zwischen 25 und 55 Jahren ($m=38.12$; $sd=5.24$) wurden sieben Teilnehmer zwischen 18 und 25 ($m=20$; $sd=1.92$) und sechs Personen älter als 55 Jahre ($m=66.83$; $sd=6.43$) untersucht. Der älteste Teilnehmer war zum Zeitpunkt der Untersuchung 78 Jahre alt. Die mittlere Fahrleistung der Teilnehmer in der Gruppe der 25 bis 55jährigen lag bei 16063km/Jahr ($sd=6875$), in der Gruppe der unter 25jährigen bei 17143km/Jahr ($sd=4298$) und bei den Teilnehmern über 55 Jahre bei 15250km/Jahr ($sd=6364$). Anzumerken ist die sehr hohe Fahrleistung der Versuchsteilnehmer, die im Widerspruch zu Anforderungen aus dem RESPONSE Code of Practice hinsichtlich potentiell schwächerer Fahrergruppen besteht.

Messgrößen und Datenaufbereitung

Die Aufbereitung der Daten und die Extraktion von Kennwerten erfolgt analog zu den vorangegangenen Studien (vgl. Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2). Die aufgezeichneten fahrphysikalischen Daten werden wiederum gefiltert (5Hz Low Pass) und ausgangslagenkorrigiert. Im Rahmen der Datenaufbereitung werden die Zeitpunkte der Auslösung und die jeweiligen Fahrzeugzustände kontrolliert. In die Analysen gehen 2362 Messungen mit aufgeschalteten Zusatzmomenten ein. Aus den Verlaufsdaten werden Minima und Maxima der Lenk- und Fahrzeugreaktionen nach Schaltung des Zusatzmoments berechnet. Die maximale Lenkradgeschwindigkeit nach dem ersten Maximum des Lenkradwinkels wird als Kennwert für die Stärke der Fahrerreaktion herangezogen (Abbildung 3-10).

Aus den beiden Extrema der fahrphysikalischen Parameter wird die Spannweite als deren Differenz berechnet. Die ermittelten Kennwerte werden mit den Bewertungen in Zusammenhang gebracht. Für die wiederholten Störungen gehen dabei die gemittelten Werte in die Analysen ein. Aufgrund der Datenstruktur werden für die statistische Analyse ANOVAs mit Messwiederholung angewendet. Die Amplitude des Zusatzmoments und das Fahrmanöver gehen als Innersubjektfaktor in die Analyse ein. Die Altersgruppe wird als Zwischensubjektfaktor definiert. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha=5\%$. Die post-hoc Testung von unterschiedlichen Faktorstufen erfolgt über einfache Kontraste und LSD-Tests.

3.3.4 Studie 4: Replikation und Validierung

Aufgrund der geringen Stichprobengröße der Altersgruppen in der vorangegangenen Studie 3 wurde in dieser Untersuchung mit ähnlichem Versuchsaufbau versucht, die Ergebnisse zu replizieren. Daher sind der Aufbau und Ablauf der beiden Studien bis auf die zugeschalteten

haptischen Signale identisch. Auch diese Studie wurde im Realfahrzeug durchgeführt. Für Versuchsaufbau und Datenaufbereitung wird daher auf Studie 3 verwiesen.

Versuchsdesign: Variation der Zusatzmomente

Hinsichtlich der Zusatzmomente wurden in dieser Studie Signale mit unterschiedlichen Anstiegssteilheiten (Gradienten) bei gleicher Maximalamplitude aufgeschaltet. Dabei gilt für den Gradienten $0 < II < III$. Mit Ausnahme des Gradienten 0, bei dem kein Signal aufgeschaltet wurde (Baseline), ist die Amplitude für alle Signaltypen konstant und entspricht der Amplitude B aus Studie 2 und 3 und damit der Stufe 3 aus Studie 1. Tabelle 3-4 gibt einen Überblick über die randomisiert aufgeschalteten Zusatzmomente. Der zeitliche Verlauf der Zusatzmomente entspricht der Darstellung in Abbildung 3-6.

Fahrsituation	Richtung	Gradient
Engstelle	Links; Rechts	0; II; III
Kurve 1 links	Links; Rechts	0; II; III
Kurve 2 links	Links; Rechts	0; II; III
Spurwechsel Ende Gasse 1	Links; Rechts	0; II; III
Spurwechsel Übergang 1	Links; Rechts	0; II; III

Tabelle 3-4: Übersicht über die gestellten Zusatzlenkmomente.

Untersuchte Stichprobe

Untersucht wurden 30 Fahrer, darunter sieben unter 25 Jahre (Alter: $m=22.25$; $sd=0.96$; Fahrleistung in km/Jahr: $m=24000$; $sd=11445$), 16 zwischen 25 und 55 Jahre (Alter: $m=34.53$; $sd=6.93$; Fahrleistung in km/Jahr: $m=26067$; $sd=20059$) und sieben älter als 55 Jahre (Alter: $m=62.43$; $sd=3.91$; Fahrleistung in km/Jahr: $m=22357$; $sd=11071$). In die Auswertungen dieses Versuchs gehen 2076 Messungen ein. Auch hier wird auf die sehr hohe Fahrleistung der Versuchsteilnehmer hingewiesen. Dies steht im Widerspruch zu Anforderungen aus dem RESPONSE Code of Practice hinsichtlich potentiell schwächerer Fahrergruppen.

4 Ergebnisse zu Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten

4.1 Auswahl der Fahrsituationen: Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten

Der Schwerpunkt dieses Abschnitts liegt auf Ergebnissen zu fahrmanöverabhängigen Effekten bei Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente. Ziel ist es, Fahrmanöver zu identifizieren, die einerseits sensitiv sind und den Übergang von sicher kontrollierbaren Systemeingriffen zu nicht mehr beherrschbaren abbilden können. Weiterhin sind solche Fahrmanöver zu identifizieren, die die Bandbreite, der im realen Straßenverkehr auftretenden Situationen möglichst vollständig abdecken. Dazu sind sowohl straßenbauliche Richtlinien heranzuziehen als auch die Leistungsbereiche eines normalen Fahrers zu berücksichtigen.

	Studie 1 Signalparameter & situative Faktoren	Studie 2 Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	Studie 3 Fahrsituation & Alterseffekte	Studie 4 Replikation & Validierung
Kapitel 4.1 Einfluss des Fahrmanövers	Gerade Kurve	Gerade	Engstelle Kurve Spurwechsel	Engstelle Kurve Spurwechsel
Kapitel 4.2 Vergleich verschiedener Fahrergruppen	Jüngere Fahrer Normalfahrer	Normalfahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer
Kapitel 4.3 Situative Faktoren & Fahrzeugparameter	Geschwindigkeit Spurführungssystem Fahrzeuge A & B	Simulatormodell	Fahrzeug C	Fahrzeug C
Kapitel 4.4 Variation der Signalparameter	Amplitude Steilheit	Amplitude Steilheit	Amplitude	Steilheit

Abbildung 4-1: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.1 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.

In diesem Abschnitt wird auf den Einfluss des Fahrmanövers eingegangen, der in zwei Studien (Studie 1, vgl. Abschnitt 3.3.1 und Studie 3, vgl. Abschnitt 3.3.3) untersucht wurde. Eine Übersicht der betrachteten Studien liefert Abbildung 4-1. Die Zusatzmomente werden auf gerader Strecke mit begrenzter Spurbreite (Engstelle 2.5m), in Kurven mit unterschiedlichen Radien und innerhalb verschiedener Handlungssequenzen während eines dynamischen Fahrmanövers (Spurwechsel) appliziert. Dabei wird vermutet, dass gleiche Störungen in Kurven zu stärkeren Fahrzeugreaktionen führen als auf gerader Strecke, diese jedoch vom Fahrer nicht schwerwiegender bewertet werden. Im Vergleich quasi-stationärer und dynamischer Manöver werden zwei sich überlagernde Effekte vermutet: Einerseits ist der Spurwechsel aufgrund der höheren Dynamik das weit schwierigere Fahrmanöver. Eine Störung innerhalb eines schwierigen Manövers wird als gravierender erachtet. Demgegenüber wird die Störung während einer aktiven Lenkbewegung des Fahrers ausgelöst. Es ist davon auszugehen, dass das Zusatzmoment durch die starke Lenkaktivität innerhalb des Manövers in den

Hintergrund tritt. Komplexe Manöver im Bereich niedriger Geschwindigkeiten, wie z.B. Kreuzungen werden nicht berücksichtigt, da sie außerhalb des Anwendungsgebietes von gegenwärtigen Spurführungssystemen liegen.

Über den Vergleich der Störungsauswirkungen bei verschiedenen Manövern lässt sich identifizieren, in welchen Fahrmanövern die stärksten Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System zu beobachten sind. In weiteren Untersuchungen sind eben diese Manöver als wesentlich zu berücksichtigen.

4.1.1 Variation und Auswahl des Fahrmanövers

In einer ersten Untersuchung zur Reaktion des Fahrers auf Zusatzlenkmomente (Studie 1, vgl. Abschnitt 3.3.1) wurden neben einer Geradeausfahrt insbesondere Kurvenfahrten betrachtet. Hierzu wurde den 18 teilnehmenden Probanden ein sprungförmiges Zusatzmoment mit maximaler Anstiegssteilheit (Abbildung 3-6) bei freier Geradeausfahrt und in quasistationärer Kurvenfahrt ausgelöst. Direkt vergleichbar zwischen den Manövern sind Zusatzmomente mit Amplitudenstufe 2 und 3, die in beiden Fahrsituationen dargestellt werden. Zur detaillierten Beschreibung des Versuchsaufbaus wird auf Abschnitt 3.3.1 verwiesen. Die Betrachtung des ersten Maximums des Lenkradwinkels zeigt eine Erhöhung bei Kurvenfahrt (Abbildung 4-2 links). Die Maximalwerte treten in beiden Bedingungen beinahe zeitgleich auf (z.B. Amplitude 3: $m_{\text{Gerade}}=224\text{ms}$; $sd=33\text{ms}$ und $m_{\text{Kurve}}=219\text{ms}$; $sd=27\text{ms}$; siehe Abbildung 4-2 rechts).

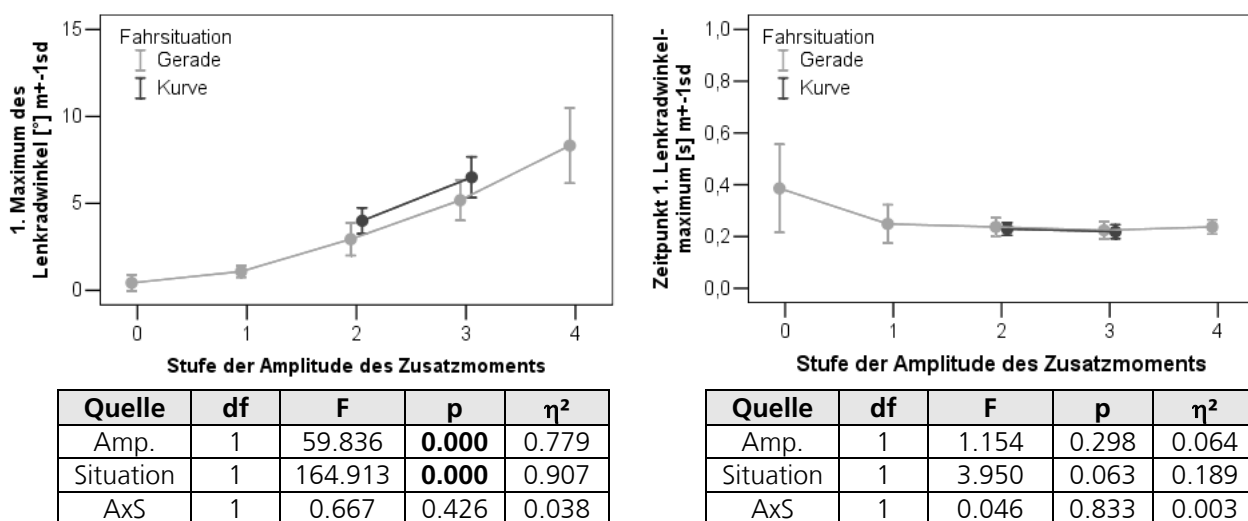


Abbildung 4-2: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dem Zeitpunkt des Lenkradwinkelmaximums (rechts) für Geraden und Kurven.

Damit sind die direkten Auswirkungen des Zusatzmoments auf die Parameter des Lenkrads kaum verschieden, obwohl sich die darauf folgende Heftigkeit der Reaktionen der Fahrer in den beiden Bedingungen deutlich voneinander unterscheidet: In der Kurve treten stark erhöhte maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeiten direkt nach dem ersten Lenkradwinkelmaximum auf (Abbildung 4-3). Während bei Amplitudenstufe 2 bei der Geradeausfahrt kaum Werte von $30^\circ/\text{s}$ überschritten werden, zeigt sich in der Kurvenfahrt schon ein Mittelwert von $104.61^\circ/\text{s}$ mit erheblicher Varianz ($sd=87.08^\circ/\text{s}$). Mit zunehmendem Lenkmoment steigt die Lenkradwinkelgeschwindigkeit in der Kurvenfahrt überproportional, bei Amplitude der Stufe 3 bis auf $m=223.86^\circ/\text{s}$ ($sd=75.30^\circ/\text{s}$) an.

Aus der Querdynamik des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt und der deutlich stärkeren Lenkkorrektur durch den Fahrer ergibt sich eine um ca. 1%/s größere maximale Spannweite der Gierrate innerhalb von 2s nach Auslösung des Zusatzmoments. Auch auf Ebene der subjektiven Daten können diese Ergebnisse untermauert werden. So werden die applizierten Zusatzmomente in der Kurve als geringfügig störender bewertet (Abbildung 4-3). Die Bewertungen verbleiben dabei in der Regel im Bereich der „Störung des Fahrens“ (vgl. Störungsbewertungsskala SBS, Abschnitt 3.2.4).

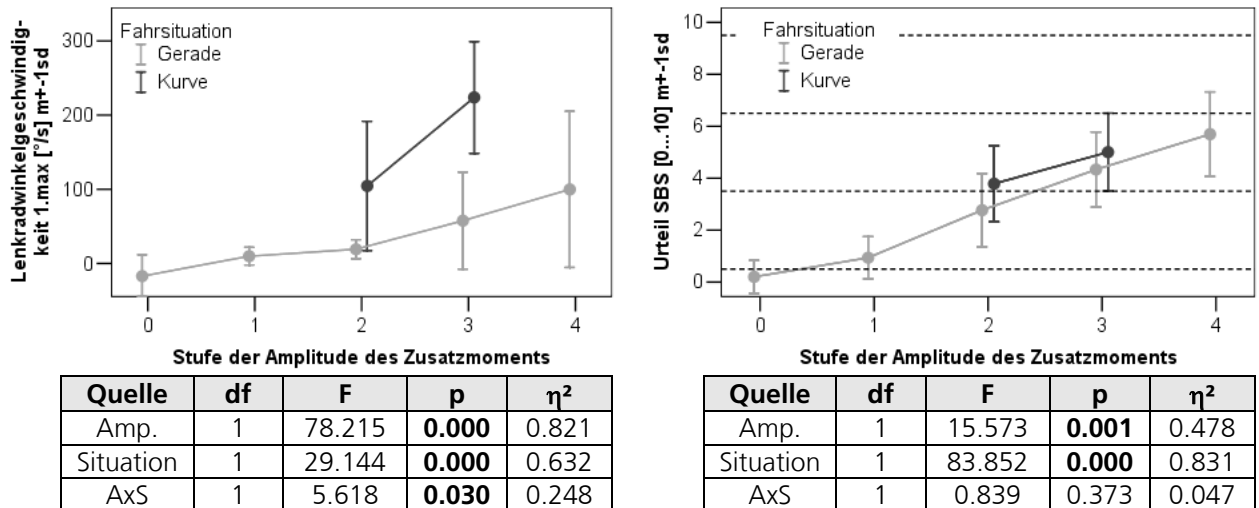


Abbildung 4-3: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für Kurve und Gerade.

4.1.2 Weiterentwicklung der Prüfsituation

In der vorangegangenen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass bei Zusatzlenkmomentenaufschaltung in Kurven etwas stärkere Fahrerreaktionen zu beobachten sind als auf freier gerader Strecke und die subjektive Bewertung der Störungsauswirkungen bei gleichen Zusatzmomenten geringfügig höher ausfällt. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurden die Fahrszenarien weiterentwickelt und in einer weiteren Studie untersucht. In dieser Studie (Studie 1, Abschnitt 3.3.1) werden die Zusatzlenkmomente in Kurven mit unterschiedlichen Krümmungsradien und während eines einfachen Fahrspurwechsels [ISO99] ausgelöst. Während des Spurwechsels werden die Zusatzmomente entweder am Ende der ersten Gasse aufgeschaltet, wenn der Fahrer das Einlenken in den Übergang einleitet, oder innerhalb des ersten Übergangs im Nulldurchgang der Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Dieser Zeitpunkt beschreibt das Einleiten des Gegenlenkens durch den Fahrer.

Verglichen werden die Störungsauswirkungen mit den Fahrer- und Fahrzeugreaktionen bei zusätzlichen Lenkmomenten während der Durchfahrt durch eine Engstelle (Pylonengasse mit 2,5m Breite) als Worst-case der Geradeausfahrt dar. Die Breite der Engstelle richtet sich nach den Mindestvorgaben aus straßenbaulichen Richtlinien [RSA07] und ist beispielsweise in Autobahnbaustellen zu finden. Die realisierten Fahrsituationen wurden in einem Oval in fester Abfolge durchfahren (Abbildung 3-11). Die Fahrgeschwindigkeit wurde mit Hilfe einer Geschwindigkeitsregelanlage auf konstant 80km/h eingestellt. Eine genaue Beschreibung von Versuchsaufbau und Stichprobe befindet sich in Abschnitt 3.3.3 (Studie 3).

Die in diesem Versuch untersuchten unterschiedlichen Fahrsituationen erlauben die Prüfung vielfältiger Aspekte. So liegt in den (quasi-)stationären Situationen „Engstelle“, „Kurve 1“ und „Kurve 2“ bei der Aufschaltung der Zusatzmomente jeweils nur sehr geringe Lenkaktivität des Fahrers vor. Bei den Aufschaltungen innerhalb des Spurwechsels hingegen wird das Zusatzmoment von der Lenktätigkeit des Fahrers überlagert. Hier liegt eine erhöhte Lenkaktivität vor. In den Kurven liegt daneben ein Ausgangslenkmoment an und das Fahrzeug befindet sich in einem querdynamisch angeregten Zustand. Diese Aspekte werden im Folgenden getrennt betrachtet. Zum Vergleich der Situationen wird die „Engstelle“ als Baseline herangezogen und jeweils mit den übrigen Fahrsituationen verglichen.

4.1.3 Der Spurwechsel: Einfluss der Lenkaktivität auf die Auswirkungen von Zusatzlenkmomenten

Zunächst werden die Reaktionen von Fahrer und Fahrzeug auf Zusatzlenkmomente, die auf gerader Strecke gestellt werden (Engstelle), mit der Aufschaltung innerhalb eines dynamischen Manövers mit hoher Lenkaktivität (Spurwechsel) verglichen. In den Spurwechseln treten schon bei Amplitude 0 deutlich größere Reaktionen auf, als in der Engstelle ($p_{\text{sit}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.894$). Da es sich bei Amplitude 0 um Baseline-Messungen handelt, bei denen kein Moment zugeschaltet wird, sind diese Unterschiede einzig auf die Anforderungen aus dem Manöver zurückzuführen. Während in der Engstelle mit steigender Amplitude immer stärkere Reaktionen des Fahrers in Form erhöhter Lenkradwinkelgeschwindigkeiten zu beobachten sind, ist dies in den Spurwechseln nur bedingt der Fall (Abbildung 4-4 links) ($p_{\text{sit} \cdot \text{amp}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.762$).

Die Bewertungen der aufgeschalteten Zusatzlenkmomente im Spurwechsel mittels der Störungsbewertungsskala liegen demgegenüber im Mittel nie über den entsprechenden Zusatzmomenten in der Engstelle (Abbildung 4-4 rechts). Zu beobachten sind vielmehr signifikant geringere Bewertungen in den Spurwechselmanövern ($p_{\text{sit}} = 0.009$; $\eta^2 = 0.145$). Die Urteile nehmen über die betrachteten Manöver mit steigender Amplitude zu ($p_{\text{amp}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.819$). Es liegt keine Wechselwirkung vor.

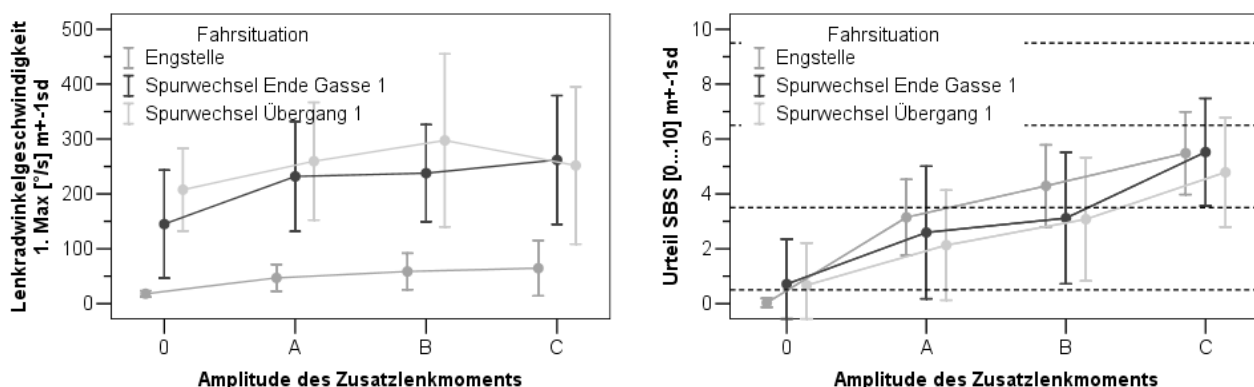


Abbildung 4-4: Maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und Bewertung der Störungsauswirkungen (rechts). Vergleich der Aufschaltungen im Spurwechsel mit Engstelle.

Die insgesamt erhöhte Lenkaktivität im Spurwechsel schlägt sich damit nicht in der Bewertung der Störungen nieder. Vielmehr weisen die in einzelnen Amplitudenstufen geringeren Urteile darauf hin, dass die Zusatzmomente während der erhöhten Lenkaktivität im Spurwechsel in den Hintergrund treten. Entgegen der ursprünglichen Annahme (vgl. Abschnitt 4.1) sind die

Zusatzmomente in dem schwierigeren Manöver „Spurwechsel“ nicht als beeinträchtigender anzusehen.

4.1.4 Die Kurvenfahrt: Einfluss der querdynamischen Ausgangslage und des Ausganglenkmoments

Bei der Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente in Kurvenfahrten liegt aufgrund der üblichen Rückstellmomente bereits ein Ausganglenkmoment an. Fahrzeug und Fahrer sind erhöhter Querbewegung ausgesetzt. Während der Faktor Ausganglenkmoment bereits in Simulatorstudien untersucht wurde [Bus03; GSN+05], wird hier die zugehörige Realsituation im Fahrzeug nachgebildet. Die Umsetzung dient der Überprüfung bereits gewonnener Ergebnisse aus einer vorangegangenen Studie. Dort wurde festgestellt, dass in Kurven erhöhte Fahrzeugreaktionen zu beobachten sind und sich diese auch geringfügig im Urteil niederschlagen. Es wurde insgesamt eine hohe Abhängigkeit von der Richtung des Zusatzmoments zum Kurveninneren (Erhöhung des Ausgangsmoments) oder zum Kurvenäußeren (Reduktion des Ausgangsmoments) festgestellt.

Zur Überprüfung des Ausmaßes eines möglichen Effektes wurden in dieser Untersuchung zwei Kurven mit unterschiedlichen Radien mit der Geradeausfahrt in der Engstelle verglichen. Insgesamt zeigen sich in den Kurven mit zunehmender Amplitudenstufe des Zusatzmoments erhöhte Reaktionen in der Lenkung ($p_{\text{sit} \cdot \text{amp}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.172$). Das 1. Maximum des Lenkwinkels nach Aufschaltung des Zusatzmoments ist sehr stark von dem zugeschalteten Signal abhängig ($p_{\text{amp}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.918$). Die Spannweite der Gierreaktion des Fahrzeugs (Abbildung 4-5, rechts) bestätigt diesen Effekt ($p_{\text{sit}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.539$). Zwischen den Kurven ergibt sich jedoch kein Unterschied (Innersubjekt Kontrast Kurve 1/Kurve 2: $p = 0.188$).

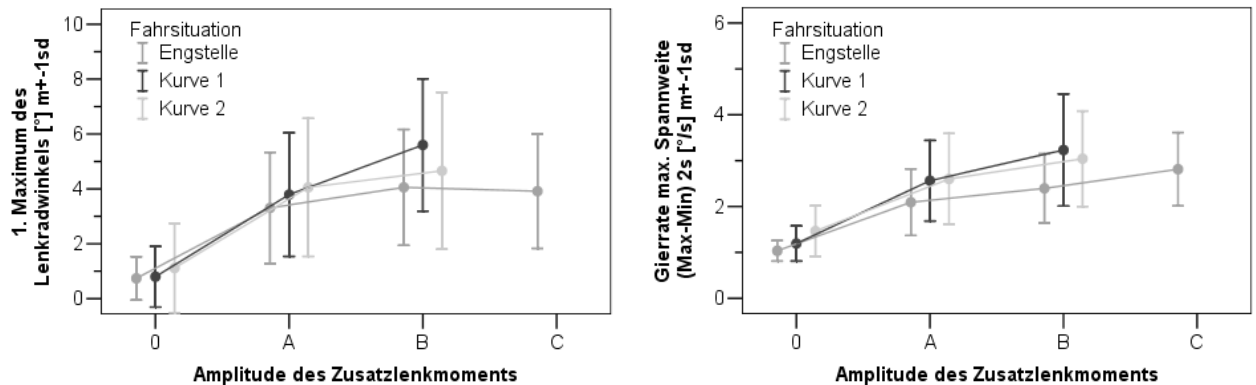


Abbildung 4-5: 1. Maximum des Lenkradwinkels (links) und Gierreaktion (rechts) nach Auslösung des Zusatzmoments in den Situationen Kurve 1 und 2 und Engstelle.

In der Beurteilung der Störungsauswirkungen zeigen sich geringe Unterschiede zwischen den Fahrsituationen „Kurve“ und „Engstelle“ (Abbildung 4-6, links) ($p_{\text{sit}} = 0.021$; $\eta^2 = 0.122$). Dabei wird die Aufschaltung in der Engstelle als am stärksten störend bewertet. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorangehenden Studie. Im Unterschied zum dortigen Versuchsaufbau wurde in dieser Untersuchung die gerade Strecke über eine Pylonengasse in der Breite stärker limitiert (3.5m Spurbreite vs. 2.5m Gassenbreite). Damit wurde das Manöver einerseits durch die Pylonengasse klarer definiert und andererseits dem Fahrer die Bewertung seiner Leistung durch die klare Referenz erleichtert. Daneben sind gleiche absolute Abweichungen in der Engstelle durch die geringere Gassenbreite relativ als schwerwiegender

zu betrachten. Damit kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass die Aufschaltung in der Kurve geringfügig kritischer ist, als auf gerader freier Strecke. Bei Begrenzung der Geraden durch eine enge Pylonengasse (hier: 2.5m) werden jedoch gleiche Zusatzmomente in Kurven und Geraden ähnlicher bewertet.

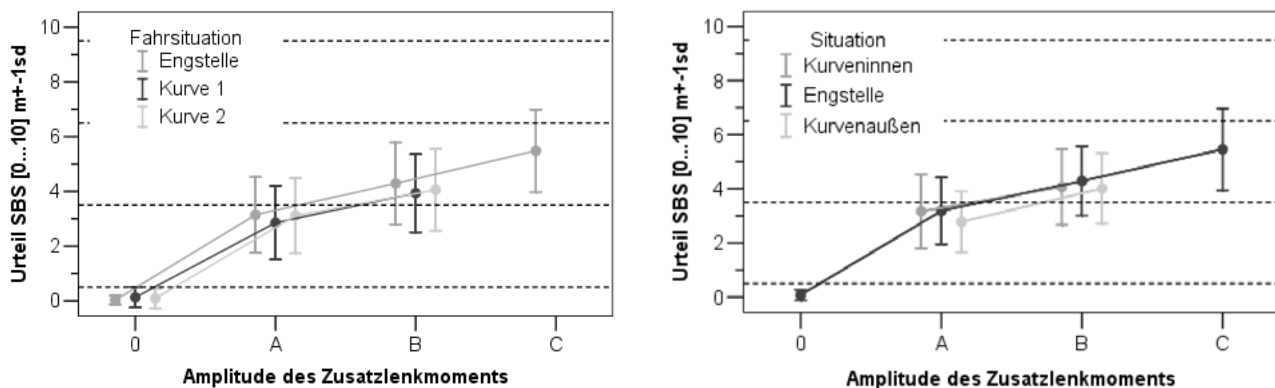


Abbildung 4-6: Bewertung der Störungsauswirkungen. Links Vergleich der Situationen Kurve 1 und 2 mit der Engstelle und rechts abhängig von der Richtung des Zusatzmoments.

Eine Aufschlüsselung der Bewertungen nach Richtung des aufgeschalteten Moments in den Kurven zeigt keine Erhöhung gegenüber der Engstelle (Abbildung 4-6 rechts). Vielmehr sind die Bewertungen bei Zusatzmomenten zur Kurvenaußenseite signifikant geringer als in der Engstelle ($p_{sit}=0.18$; $\eta^2=0.125$; Innersubjektkontraste Engstelle/Kurveninnen: $p=0.366$; $\eta^2=0.027$; Engstelle/Kurvenaußen: $p=0.002$; $\eta^2=0.276$). Unabhängig von Erhöhung oder Reduktion des Ausgangsmoments über die relativ zur Kurvenkrümmung gestellte Richtung sind die Bewertungen in der Hauptsache abhängig von der Amplitude ($p_{amp}<0.001$; $\eta^2=0.825$). In den Maßen der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen ist dagegen ein deutlicher Einfluss der Aufschaltungsrichtung festzustellen (Abbildung 4-7). Sowohl in der maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($p_{sit}<0.001$; $\eta^2=0.892$) als auch in der Gierreaktion ($p_{sit}<0.001$; $\eta^2=0.733$) führt die Reduktion des Ausgangsmoments bei Stellung zur Kurveninnenseite deutlich zu den stärkeren Reaktionen. In Verbindung mit den Bewertungen ist die Aufschaltungsrichtung jedoch nicht als kritisch anzusehen.

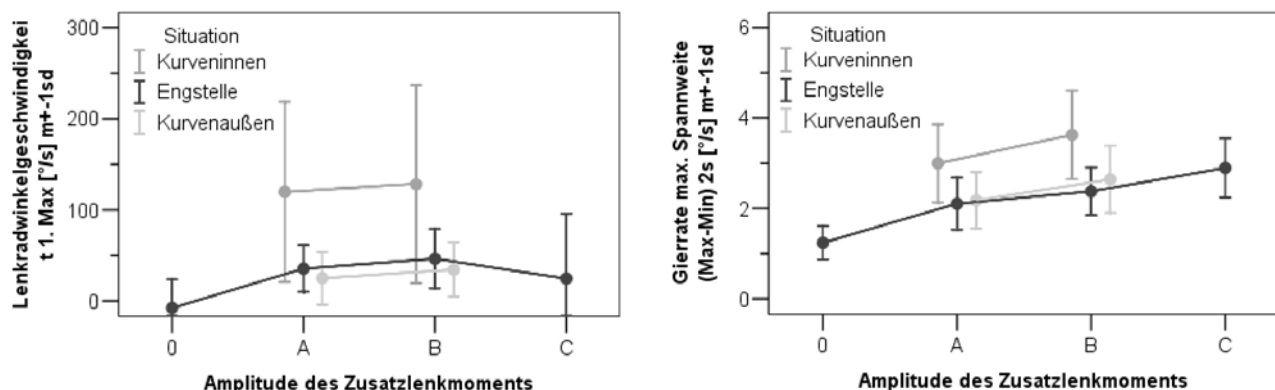


Abbildung 4-7: Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und Gierreaktion des Fahrzeugs (rechts) in Abhängigkeit der Richtung des Zusatzmoments relativ zur Engstelle.

4.1.5 Zusammenfassung

Zur Betrachtung des Einfluss der Fahrsituation auf Reaktion und Bewertung des Fahrers bei Darbietung zusätzlicher Lenkmomente wurden neben einer Engstelle, die über eine 2.5m breite Pylonengasse realisiert wurde, ein einfacher Spurwechsel sowie Kurven mit unterschiedlichem Radius befahren. Durch die Kurven wurden Situationen mit unterschiedlichem Ausgangslenkmoment und unterschiedlicher querdynamischer Ausgangslage geschaffen. Die Ergebnisse zeigen, dass in den Kurven zwar erhöhte Fahrer- und damit auch Fahrzeugreaktionen auf die Zusatzmomente folgen, die Störungsauswirkungen aber gegenüber der Engstelle nicht schwerwiegender eingeschätzt werden. Die querdynamische Ausgangslage besitzt hier keinen Einfluss auf die Bewertung des Fahrers.

Eine Aufschlüsselung nach Aufschaltungsrichtung des Lenkmoments präzisiert diese Ergebnisse: Nur die Aufschaltungen in Richtung Kurveninnenseite führen zu erhöhten Fahrer- und Fahrzeugreaktionen. Zusatzmomente zur Kurvenaußenseite unterscheiden sich im Vergleich zur Aufschaltung in der Engstelle nicht. Die Bewertung der Störungsauswirkungen hingegen ist unabhängig von der Richtung des Zusatzmoments. Bei Reduktion (Aufschaltung Richtung Kurveninnenseite) führen gleiche Zusatzmomente dennoch zu größeren Lenk- und Fahrzeugreaktionen; die geringeren Fahrzeugreaktionen werden bei Erhöhung gleich bewertet. Als Ursache können die in der Literatur dargestellten geringeren Wahrnehmungsschwellen bei Erhöhung (Aufschaltung Richtung Kurvenaußenseite) angesehen werden [Bus03; GSN⁺05].

Gleichzeitig legen diese Erkenntnisse nahe, dass der Fahrer nicht allein das Moment in der Lenkung wahrnimmt, sondern die Bewegung eine entscheidende Rolle spielt. Ergebnisse von [GSN⁺05] unterstützen diese Vermutung. Dort konnte gezeigt werden, dass Zusatzmomente immer dann besser wahrgenommen werden konnten, wenn eine Lenkwinkelveränderung von mindestens 3° zu beobachten war. Welche objektive Führungsgröße ausschlaggebend für die Wahrnehmung und Bewertung durch den Fahrer ist, sollte in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet werden.

Die Erhöhung der Lenkaktivität bei Applikation der Zusatzmomente über die unterschiedlichen Aufschaltungszeitpunkte im Spurwechsel ergibt keine Erhöhung der Schwierigkeit der Situation im Vergleich zur Engstelle mit geringer Lenkaktivität. Gleiche Lenkmomente werden in dieser Untersuchung bei erhöhter Lenkaktivität nicht als schwieriger bewertet. Vielmehr unterstreichen die signifikant geringeren Bewertungen bei einzelnen Amplitudenstufen im Spurwechsel, dass die Zusatzlenkmomente bei stärkeren Lenkbewegungen des Fahrers eher zu vernachlässigen sind. Im Sinne einer Signalentdeckung [Gre66] ist bei stärkerer Grundaktivität das Zusatzsignal schwieriger zu identifizieren. Von einem Einfluss der erhöhten Schwierigkeit des Spurwechsels gegenüber der Engstelle kann nach den bisherigen Ergebnissen nicht ausgegangen werden.

In Bezug auf die Fahrsituationen bedeuten die Ergebnisse dieser Untersuchung somit: Engstelle und Kurve unterscheiden sich nicht hinsichtlich der Störungsbewertung. Im Spurwechsel werden Störungen eher geringer bewertet. Damit erscheint es bei folgenden Untersuchungen der Auswirkungen von Zusatzmomenten sinnvoll, lediglich die Fahrsituation Engstelle zu wählen, da Zusatzmomente in dieser Situation am stärksten störend bewertet werden.

In Verbindung mit bisherigen Ergebnissen ergibt sich ein Unterschied zwischen den Situationen Geradeausfahrt und Engstelle 2.5m. Die Engstelle ist in der Breite limitiert und das zugehörige Fahrmanöver (fehlerfreies Durchfahren der Engstelle) auch klarer definiert. Dem Fahrer wird eine Bewertung seiner Leistung durch die klare Referenz erleichtert. Eine Aufschaltung bei Geradeausfahrt ohne enge Begrenzung der Spurbreite erscheint nach den bisherigen Ergebnissen nicht geeignet, um als alleinige Fahrsituation die Auswirkungen von Zusatzlenkmomenten auf das System Fahrer-Fahrzeug zu betrachten.

Die Frage nach dem sensitivsten Fahrmanöver lässt sich damit weitgehend beantworten: Er spürt besser, wenn das Fahrzeug sich in einem stationären Zustand befindet. Das geringe Grundrauschen hilft bei der Wahrnehmung. Darüber hinaus kann er die Auswirkungen von Störungen besser bewerten, wenn die Fahrsituation eng definiert und das Fahrmanöver schwierig gestaltet ist. Nur unter dieser Bedingung wird dem Fahrer die Referenz geliefert, die für seine Bewertung notwendig ist. Tabelle 4-1 fasst die zentralen Ergebnisse aus Gründen der Übersichtlichkeit zusammen.

1	Die 2,5m breite Engstelle erweist sich als die sensitivste der untersuchten Fahrsituation bei der Bewertung von Zusatzlenkmomenten. Weitere Studien sollten die Engstelle als Fahrsituation fokussieren.
2	Gleiche Störungsaufschaltungen bei Geradeausfahrt, in Kurven und während unterschiedlicher Zeitpunkte eines Spurwechsels werden als weniger stark störend vom Fahrer bewertet.
3	In Kurven ergeben sich bei Aufschaltung in Richtung Kurvenaußenseite stärkere Fahrer- und Fahrzeugreaktionen. Diese gehen nicht mit erhöhten Bewertungen durch den Fahrer überein.
4	Die Ergebnisse legen nahe, dass der Fahrer nicht ausschließlich das Moment in der Lenkung wahrnimmt und bewertet. Gleichzeitig scheinen Bewegungsgrößen in sein Urteil einzugehen.
5	Bei erhöhter Lenkaktivität (hier: beim Durchfahren eines Spurwechsels) werden gleichstarke Zusatzmomente als weniger störend bewertet.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Betrachtung der Fahrsituationen.

4.2 Subpopulationen potentiell schwächerer Fahrer

Ausgehend von den Anforderungen des Code of Practice zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wurden in Abschnitt 3.2.1 über Unfallanalysen [Sta08; Sch93a] jüngere, unerfahrene Fahrer als potentiell gefährdete Subpopulation identifiziert. Einhergehend mit Einbußen in der Sehfähigkeit, Motorik und der Informationsverarbeitung steigt das Unfallrisiko im Straßenverkehr auch für ältere Fahrer leicht an. Aus diesen Überlegungen werden hier daher jüngere und ältere Fahrer als potentiell schwächere oder stärker gefährdete Subpopulationen berücksichtigt. Eine Übersicht über die in diesem Abschnitt betrachteten Studien bietet Abbildung 4-8. Die durchgeführten Vergleiche der Altersgruppen aus Studie 3 (Abschnitt 4.2.1) werden in Studie 4 im Sinne einer Validierung überprüft (Abschnitt 4.2.2).

4.2.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse

Zur Prüfung dieser Annahme wird untersucht, ob Zusatzmomente bei diesen Subgruppen zu anderen Ergebnissen führen als bei Fahrern mittleren Alters. In diesem Fall wären diese in weiteren Untersuchungen besonders zu berücksichtigen. Hierzu werden Subpopulationen

unterschiedlichen Alters mit Zusatzlenkmomenten unterschiedlicher Amplituden konfrontiert und die Auswirkungen auf Fahrer und Fahrzeug erfasst. Versuchsaufbau und Ergebnisse

Aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 wird die Geradeausfahrt für die Betrachtung von Alterseffekten und Einflüssen der Fahrerfahrung gewählt. Den Worst-case der Geradeausfahrt stellt hier ein Engstellenszenario dar, dass über eine 2.5m breite Pylonengasse realisiert wurde. Für die genaue Versuchsbeschreibung wird auf Abschnitt 3.3.3 (Studie 3) verwiesen. In den folgenden Split-Plot ANOVAs werden ausschließlich die Amplituden A, B und C berücksichtigt. Ein Einbeziehen der Baseline-Amplitude 0 erscheint nicht sinnvoll, da die Effektstärken bei den unterschiedlichen Stufen beleuchtet werden sollen.

	Studie 1 Signalparameter & situative Faktoren	Studie 2 Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	Studie 3 Fahrsituation & Alterseffekte	Studie 4 Replikation & Validierung
Kapitel 4.1 Einfluss des Fahrmanövers	Gerade Kurve	Gerade	Engstelle Kurve Spurwechsel	Engstelle Kurve Spurwechsel
Kapitel 4.2 Vergleich verschiedener Fahrergruppen	Jüngere Fahrer Normalfahrer	Normalfahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer
Kapitel 4.3 Situative Faktoren & Fahrzeugparameter	Geschwindigkeit Spurführungssystem Fahrzeuge A & B	Simulatormodell	Fahrzeug C	Fahrzeug C
Kapitel 4.4 Variation der Signalparameter	Amplitude Steilheit	Amplitude Steilheit	Amplitude	Steilheit

Abbildung 4-8: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.2 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Auswirkungen der Zusatzlenkmomente unterschiedlicher Amplituden. Betrachtet werden die direkten Auswirkungen der Momente auf die Lenkung sowie Zeitpunkt und Stärke der Fahrerreaktion. Seitens der fahrphysikalischen Reaktion des Fahrzeugs auf die Zusatzmomente und darauf folgende Fahrereingaben wird die Gierreaktion analysiert und den subjektiven Bewertungen gegenübergestellt. Die Auswertungen vergleichen dabei zwischen den verschiedenen Altersgruppen. Abbildung 4-9 zeigt die Auswirkungen des Zusatzmomentes über das erste Maximum des Lenkradwinkels. Für alle Amplituden größer 0 zeigt sich eine mittlere Auslenkung des Lenkrades durch die Aufschaltung des Momentes um 3.77° . Hinsichtlich des Einflusses der Amplitude des Zusatzmoments zeigt sich eine stärkere Auslenkung bei den Amplitude B und C gegenüber A ($p=0.011$; $\eta^2=0.149$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B}=0.002$; $p_{A-C}=0.018$; $p_{B-C}=0.657$). Dies zeigt, dass bis zu einer bestimmten Stärke der Amplitude die Auswirkungen auf den Lenkwinkel ansteigen. Bei den Amplituden B und C werden die Zusatzmomente bei den hier verwendeten Signalformen vom Fahrer bei gleichen Auslenkungen kompensiert. Zwischen den Altersgruppen ist nicht von Unterschieden auszugehen ($p=0.984$).

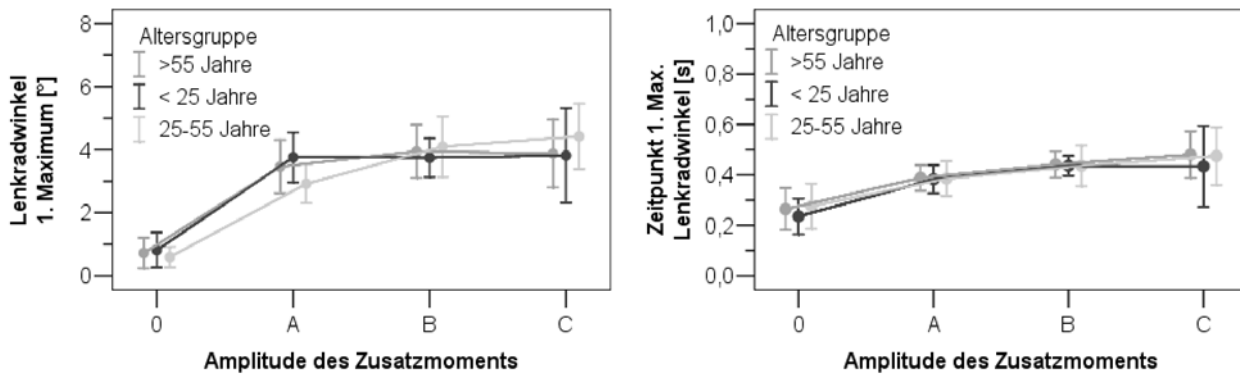


Abbildung 4-9: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dessen Zeitpunkt (rechts) pro Altersstufe abhängig von der Amplitude des Zusatzmoments.

Abbildung 4-9 (rechts) zeigt den Zeitpunkt des ersten Maximums des Lenkradwinkels nach Aufschaltung eines Zusatzmomentes. Dieser Kennwert kennzeichnet den Zeitpunkt des Fahrereingriffs und ist daher ein Maß für die Reaktionszeit des Fahrers. Hinsichtlich der Schnelligkeit der Reaktion ist kein Unterschied zwischen den Altersgruppen festzustellen ($p=0.714$). Jüngere und ältere Fahrer reagieren im Mittel gleich schnell nach 431ms auf die hier dargestellten Zusatzmomente. Dabei steigt die Reaktionszeit von Amplitudenstufe A zu den beiden anderen Stufen B und C signifikant an ($p=0.002$; $\eta^2=0.201$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B}=0.003$; $p_{A-C}=0.001$ $p_{B-C}=0.334$). Hierbei ist weniger von einer langsameren Fahrerreaktion als vielmehr von einem länger andauernden Anstieg des Signals auszugehen.

Die Heftigkeit der Fahrerreaktion wird über die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach dem ersten Maximum des Lenkradwinkels beschrieben. In Abbildung 4-10 ist auf der linken Seite dieses Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit dargestellt. Die beobachteten Fahrerreaktionen liegen im Mittel deutlich unter 100%/s. Diese Werte sprechen für eine recht langsame und kontrollierte Reaktion und unterstützen die Annahme, dass die hier dargestellten Zusatzmomente vom Fahrer gut zu kontrollieren waren. Die Heftigkeit der Reaktionen unterscheidet sich nicht zwischen den Altersgruppen ($p=0.410$). Bei Amplitude A treten gegenüber B und C geringere Werte auf ($p=0.001$; $\eta^2=0.214$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B}=0.005$; $p_{A-C}=0.002$; $p_{B-C}=0.100$). Die rechts in der Abbildung 4-10 dargestellte Stärke der Gierreaktion nach Aufschaltung der Zusatzmomente verhält sich ähnlich: Auch hier besteht kein Unterschied zwischen den Altersgruppen ($p=0.496$). Eine größere Amplitude führt jedoch zu stärkeren Gierreaktionen ($p<0.001$; $\eta^2=0.625$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B}=0.004$; $p_{A-C}<0.001$; $p_{B-C}<0.001$).

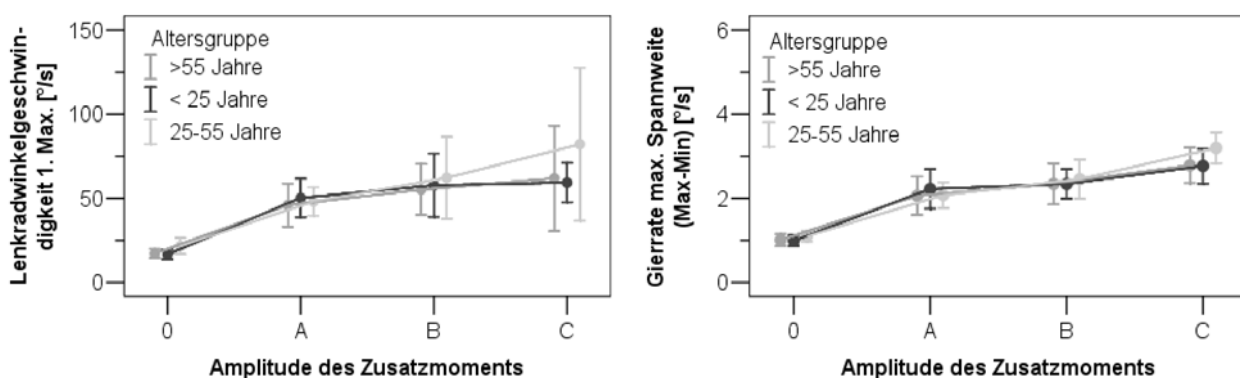


Abbildung 4-10: Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach Fahrereingriff (links) und maximale Spannweite der Gierrate (rechts) pro Altersstufe abhängig von der Amplitude des Zusatzmoments.

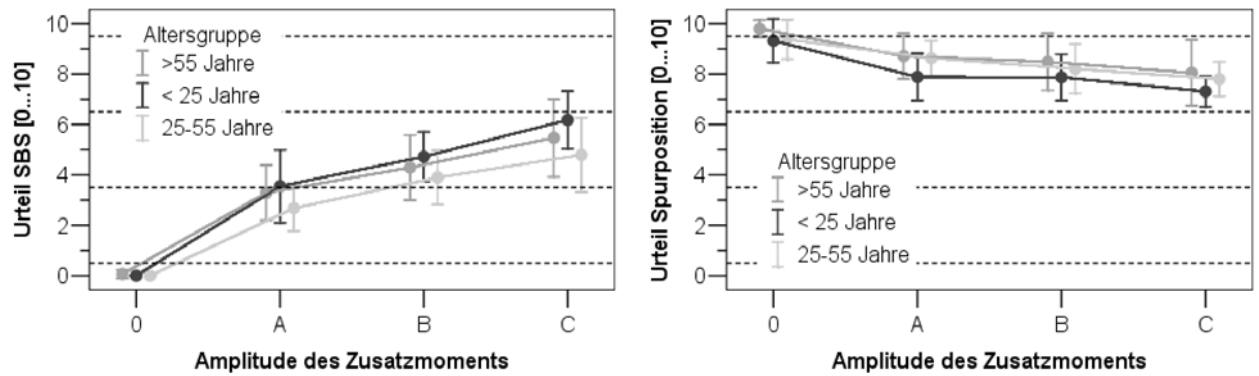


Abbildung 4-11: Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente (links) und der Abweichung von der Spurmitte (rechts) pro Altersstufe über die Amplitude des Zusatzmoments.

Die Bewertung der Störungsauswirkungen in Abbildung 4-11 links zeigt einen signifikanten Anstieg mit zunehmender Amplitude des Zusatzmoments ($p < 0.001$; $\eta^2 = 0.765$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B} < 0.001$; $p_{A-C} < 0.001$; $p_{B-C} < 0.001$). In Abbildung 4-11 rechts ist die Bewertung der Spurabweichung dargestellt. Bei der größten Amplitude C wird die Abweichung von der Idealspur als größer im Vergleich zu den geringeren Amplituden bewertet ($p < 0.001$; $\eta^2 = 0.384$; LSD post hoc Tests: $p_{A-B} = 0.060$; $p_{A-C} < 0.001$; $p_{B-C} < 0.001$). In diesen beiden subjektiven Maßen zeigen sich keine signifikanten Alterseffekte (Störungsauswirkungen: $p = 0.239$; Spurabweichung: $p = 0.240$).

4.2.2 Replikation der Ergebnisse

Aufgrund der geringen Stichprobengröße der oben aufgeführten Studie 3 wird in einer weiteren Untersuchung mit ähnlichem Versuchsaufbau (Studie 4) versucht, die Ergebnisse zu replizieren. Das Fahrscenario entspricht der „Engstelle“ in der vorher beschriebenen Studie 3, eine genaue Beschreibung von Versuchsaufbau und Stichprobe befindet sich in Abschnitt 3.3.4.

Abbildung 4-12 zeigt den maximalen Lenkradwinkel nach Zuschaltung des Zusatzmoments und die Bewertung der Störungsauswirkungen durch den Versuchsteilnehmer. Analog zu den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchung kann auch hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen festgestellt werden. Es zeigt sich ein Einfluss des Gradienten auf den Lenkradwinkel ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.411$; $p_{\text{age}} = 0.784$; $\eta^2 = 0.018$) und der Störungsbewertung zwischen den beiden Signalen II und III ($p_{\text{grad}} = 0.009$; $\eta^2 = 0.225$; $p_{\text{age}} = 0.590$; $\eta^2 = 0.038$). Nicht dargestellt sind hier die abhängigen Variablen: Urteil der Spurposition, Zeitpunkt des Fahrereingriffs, Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach Eingriff, Spannweite von Gierrate und Querbeschleunigung. Auch innerhalb dieser Kennwerte ist kein genereller Einfluss der Altersgruppenzugehörigkeit festzustellen (Tabelle 4-2).

	Quelle	F	df Hypothese	df Fehler	p	η^2
Between	Altersgruppe	.980	14	44	0.488	0.238
Within	Gradient	3.387	7	21	0.014	0.530
	Gradient * Altersgruppe	2.048	14	44	0.036	0.395

Tabelle 4-2: MANOVA Pillai's Trace

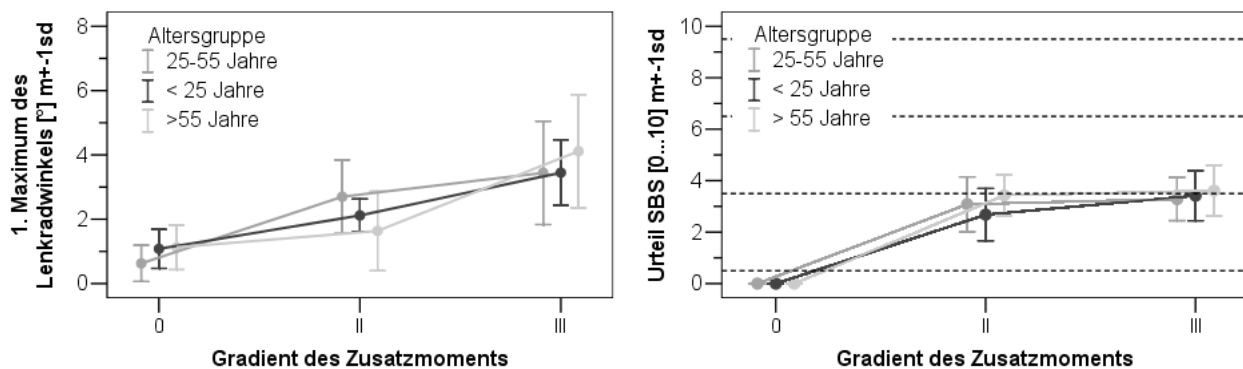


Abbildung 4-12: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente (rechts) pro Altersstufe abhängig vom Gradienten.

4.2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann damit festgehalten werden, dass in den hier betrachteten Maßen keine Unterschiede zwischen älteren und jüngeren Fahrern zu beobachten sind. Hervorzuheben ist die umgekehrte Testlogik, die in diesem Fall zum Tragen kommt: So gilt es nicht, zu testen, ob sich die Subgruppen voneinander unterscheiden. Dies bedeutet, die Nullhypothese abzulehnen, wenn diese unwahrscheinlich ist (α -Fehler) und damit die Alternativhypothese anzunehmen. Vielmehr soll hier auf Gleichheit der Subgruppen getestet werden. Hierbei wird solange von der Alternativhypothese ausgegangen, bis die Wahrscheinlichkeit für deren Richtigkeit geringer 5% ist. Damit ist das Ziel die Minimierung des β -Fehlers. Da sich der α -Fehler und der β -Fehler umgekehrt proportional zueinander verhalten, gilt als Konvention ein $\alpha > 20\%$ als hinreichend für die Annahme der Nullhypothese. Die o. a. Testungen erfüllen diese Bedingung. Daher ist nicht nur davon auszugehen, dass die Nullhypothese (Gleichheit der Altersgruppen) beibehalten werden muss, sondern vielmehr die Alternativhypothese so unwahrscheinlich ist, dass davon auszugehen ist, dass die Gruppen gleich auf die Zusatzmomente reagieren. Die Ergebnisse der ersten Studie konnten mit einer zweiten Stichprobe vollständig repliziert werden.

Damit wurde versucht, den Vorgaben aus RESPONSE Rechnung zu tragen und potentiell schwächere Fahrergruppen zu berücksichtigen. Kritisch anzumerken ist die hohe mittlere Fahrleistung der älteren und jüngeren Fahrer in beiden Versuchen, die im Gegensatz zu den Anforderungen aus RESPONSE stehen. Demgegenüber wurde mit dem Fahrmanöver Engstelle ein Manöver mit erhöhter Schwierigkeit für den Fahrer gewählt. So stellt die Engstelle maximale Anforderungen hinsichtlich der Präzision der Querführung dar. Es sei dabei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das Ziel nicht die Identifikation eines sensitiven Manövers zur Differenzierung von Altersunterschieden war.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die untersuchten älteren als auch die jüngeren Fahrer in der gestellten Fahraufgabe die gleiche Leistung zeigten wie die Teilnehmer mittleren Alters. Die hier dargestellten Ergebnisse legen nahe, diese beiden Subpopulationen im Weiteren nicht gesondert zu betrachten und leisten damit einen Beitrag für das methodische Vorgehen in künftigen Untersuchungen. Allerdings ist davon auszugehen, dass es sich bei den freiwilligen Teilnehmern an der hier durchgeführten Studie eher um Personen mit Affinität zum und Spaß am Autofahren handelt. Fahrer mit Leistungseinschränkungen, die im Straßenverkehr vermehrt Problemen begegnen, werden sich freiwillig kaum zu solchen Fahrstudien melden.

Damit stellt die Rekrutierung von älteren schwächeren Fahrern ein Dilemma dar, das kaum lösbar erscheint. Bei der Auswahl für diese Studie wurde Wert darauf gelegt, dass auch deutlich ältere Teilnehmer berücksichtigt wurden. Weiterhin kann kritisiert werden, dass die hier untersuchten Fahrmanöver Realsituationen nur bedingt abbilden. Zwar wird versucht unterschiedliche Fahrzeugzustände über die Manöver zu realisieren, eine hohe Komplexität z.B. durch weitere Fahrzeuge oder Kreuzungssituationen ist jedoch nur sehr eingeschränkt gegeben. Kritisch anzumerken ist dieser Aspekt vor allem vor dem Hintergrund, dass die Schwierigkeiten älterer Fahrer insbesondere in komplexeren Situationen auftreten [Sch93a]. Auch die Stichprobengröße in den beiden Studien mit sechs bis sieben Teilnehmern in den Subgruppen älterer und jüngerer Fahrer muss kritisch angemerkt werden. Dieser Einschränkung wurde versucht, über die Replikation der Ergebnisse aus der ersten Studie in der beschriebenen zweiten Studie zu begegnen. Tabelle 4-3 fasst die zentralen Aussagen dieses Abschnitts kurz zusammen.

1	Es wurden in beiden Untersuchungen keine Unterschiede bei älteren und jüngeren Fahrern gegenüber Fahrern mittleren Alters festgestellt.
2	Anzumerken ist die hohe mittlere Fahrleistung der jüngeren und älteren Versuchspersonen. Diese steht nicht vollständig im Einklang zu den Anforderungen aus RESPONSE zur Testung potentiell schwächerer Fahrergruppen.
3	Es wird darauf hingewiesen dass die Rekrutierung von potentiell schwächeren Fahrern ein generelles Dilemma darstellt, da sich diese Fahrer kaum freiwillig für Fahrversuche zur Verfügung stellen.

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Betrachtung von Subpopulationen potentiell schwächerer Fahrer.

4.3 Situative Parameter

Nach der Betrachtung der Auswirkungen von zusätzlichen Lenkmomenten in unterschiedlichen Fahrsituationen auf verschiedene Altersgruppen wird in diesem Abschnitt auf den Einfluss unterschiedlicher situativer Parameter eingegangen. Betrachtet werden der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Fahrzeugmodells. Daneben werden Zusatzmomente bei gleichzeitig aktiver Spurführungsassistenz dargestellt. (Abbildung 4-13).

	Studie 1 Signalparameter & situative Faktoren	Studie 2 Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	Studie 3 Fahrsituation & Alterseffekte	Studie 4 Replikation & Validierung
Kapitel 4.1 Einfluss des Fahrmanövers	Gerade Kurve	Gerade	Engstelle Kurve Spurwechsel	Engstelle Kurve Spurwechsel
Kapitel 4.2 Vergleich verschiedener Fahrergruppen	Jüngere Fahrer Normalfahrer	Normalfahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer
Kapitel 4.3 Situative Faktoren & Fahrzeugparameter	Geschwindigkeit Spurführungssystem Fahrzeuge A & B	Simulatormodell	Fahrzeug C	Fahrzeug C
Kapitel 4.4 Variation der Signalparameter	Amplitude Steilheit	Amplitude Steilheit	Amplitude	Steilheit

Abbildung 4-13: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.3 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.

4.3.1 Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit

Der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit wurde in Studie 1 (vgl. Abschnitt 3.3.1) bei freier Geradeausfahrt in einem VW Touran (Lenkungsabstimmung B) untersucht. Hierzu wurden zwei Geschwindigkeitsstufen gewählt, die eine große Bandbreite des im realen Verkehr gefahrenen Geschwindigkeitsbereiches abdecken. Die hier gewählten Geschwindigkeiten liegen bei 70 und 100 km/h. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf sprungförmig mit maximaler Anstiegssteilheit gestellte Zusatzmomente bei 18 Versuchspersonen (siehe Abschnitt 3.3.1). Es zeigt sich kein Gesamteffekt durch die Geschwindigkeit hinsichtlich des ersten Lenkradwinkelmaximums und der maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit als Maß für die Heftigkeit der Reaktion des Fahrers (Abbildung 4-14). Lediglich bei einzelnen Amplitudenstufen sind geringe Unterschiede festzustellen.

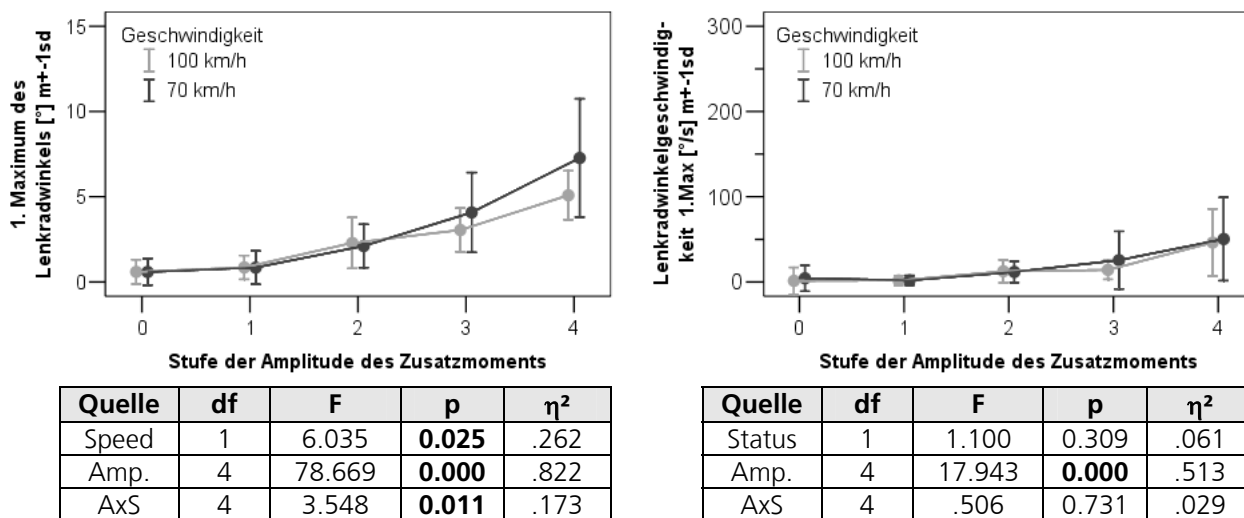


Abbildung 4-14: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und Bewertung der Auswirkungen Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments. Aufschaltung der Zusatzmomente bei 70 und 100 km/h.

Auch die Fahrzeugreaktionen in Form der Spannweite der Gierreaktionen und die Bewertung der Störungsauswirkungen unterscheiden sich nicht zwischen den beiden untersuchten Geschwindigkeiten (Abbildung 4-15). Damit erscheint die Geschwindigkeit nicht als genereller Einflussfaktor auf die Fahrerreaktion. An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei steigender Geschwindigkeit die Rückstellkraft der Lenkung größer und gleichzeitig die Gierdämpfung des Fahrzeugs erhöht ist. Bei deutlich höheren Geschwindigkeiten über 100 km/h treten diese Effekte der Lenkungsabstimmung noch deutlicher in den Vordergrund, so dass im hier untersuchten Bereich größtmögliche Fahrzeugreaktionen zu beobachten sind.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführte Geschwindigkeitsvariation von 70 und 100 km/h keine Auswirkungen auf die Bewertung und Reaktion des Fahrers bei zusätzlich aufgeschalteten Lenkmomenten besitzt. Zu vermuten ist, dass sowohl die geschwindigkeitsabhängige Anpassung der Elektromechanischen Servolenkung als auch die sich mit der Geschwindigkeit veränderten Gierdämpfungseigenschaften des Fahrzeugs so aufeinander abgestimmt sind, dass gleichstarke Fahrzeugreaktionen bei den unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen auftreten. Mit weiter steigender Geschwindigkeit sollten sich die Auswirkungen der Zusatzmomente aufgrund der stark zunehmenden Gierdämpfung noch geringer ausfallen.

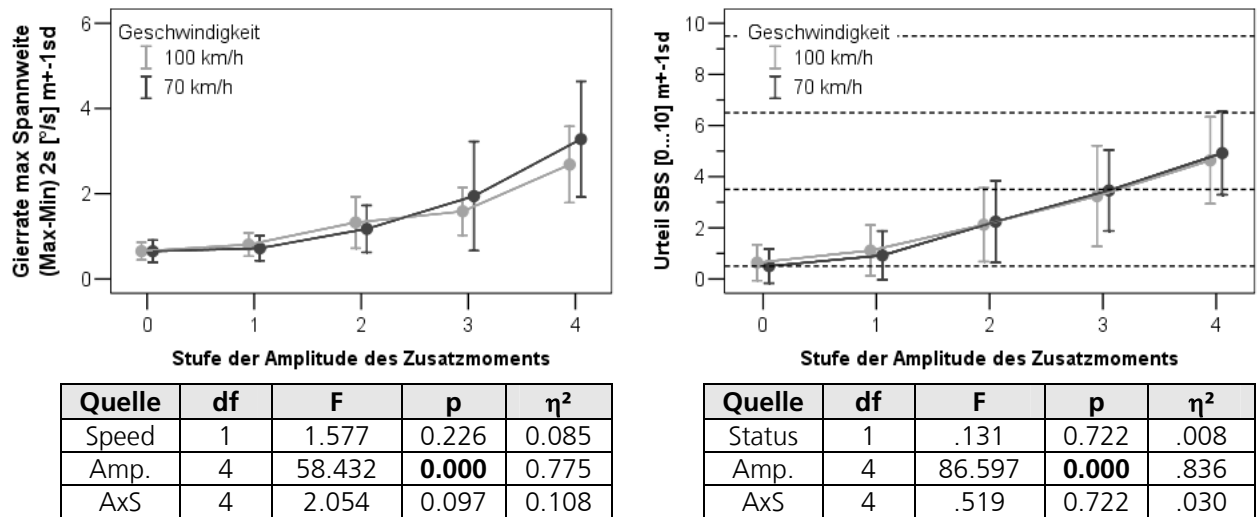


Abbildung 4-15: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments. Aufschaltung der Zusatzmomente bei 70 und 100km/h.

4.3.2 Aktivierte Spurführungsassistentz

Bei der bisherigen Untersuchung der Auswirkung der Zusatzmomente wurden die Lenkmomentsignale aufgeschaltet ohne dass weitere Eingriffe in die Lenkung stattfanden. Da Lenkungseingriffe über Zusatzmomente ein vielversprechendes Mittel für die Unterstützung des Fahrers bei seiner Querregelaufgabe darstellen (Abschnitt 2.2), können starke Eingriffe in die Lenkung insbesondere bei aktivierter Spurführungsassistentz und dazugehörigen Lenkungseingriffen auftreten. Aus diesem Grund sollen in diesem Abschnitt die Auswirkungen von Zusatzmomenten bei gleichzeitig aktivierter Spurführungsassistentz mit Eingriffen in die Lenkung betrachtet und mit den Auswirkungen bei nicht-aktivierter Querassistentz verglichen werden.

Die Untersuchung wurde in einem Versuchsträger auf Basis eines VW Touran durchgeführt, der zu Forschungszwecken mit einem Spurführungssystem ausgestattet wurde (Studie 1, vgl. Abschnitt 3.3.1). Das Spurführungssystem wurde derart parametrisiert, dass es über begrenzte Lenkungseingriffe das Fahrzeug stets in der Mitte der Fahrspur hält. Der Fahrer hatte dabei die Hände am Lenkrad zu halten und das System zu überwachen. Bei freier Geradeausfahrt und aktiviertem Spurführungssystem wurden Zusatzmomente unterschiedlicher Amplituden und Anstiegssteilheiten zugeschaltet. Dabei wurden sprungförmige Zusatzmomente mit maximaler Anstiegssteilheit als auch rampenartige Momente mit limitiertem Gradienten untersucht. Die Messungen wurden mit entsprechenden Messungen ohne aktivierte Spurführungsassistentz verglichen. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf 18 Versuchspersonen, die im Sinne eines Cross-over Designs nacheinander mit bzw. ohne aktivierte Spurführungsunterstützung gefahren sind (Versuchsbeschreibung siehe Abschnitt 3.3.1).

Insgesamt zeigt sich für die sprungförmigen Zusatzmomente aller dargestellten Amplitudenstufen kein Einfluss der Spurführungsassistentz. Weder in Parametern des Lenkens (Abbildung 4-16 links) noch in Fahrer- oder Fahrzeugreaktionen ist ein signifikanter Unterschied durch vorheriges Fahren mit Spurführungsunterstützung zu beobachten. Auch die Bewertung der Störungsauswirkungen durch den Fahrer wird nur unwesentlich beeinflusst (Abbildung 4-16 rechts). Die plötzliche Veränderung des Lenkmoments stellt eine einfache Signalentdeckungs-

aufgabe für den Fahrer dar. Dies erklärt die ähnliche Reaktion der Fahrer bei aktivierter gegenüber nicht aktivierter Spurführungsassistentz.

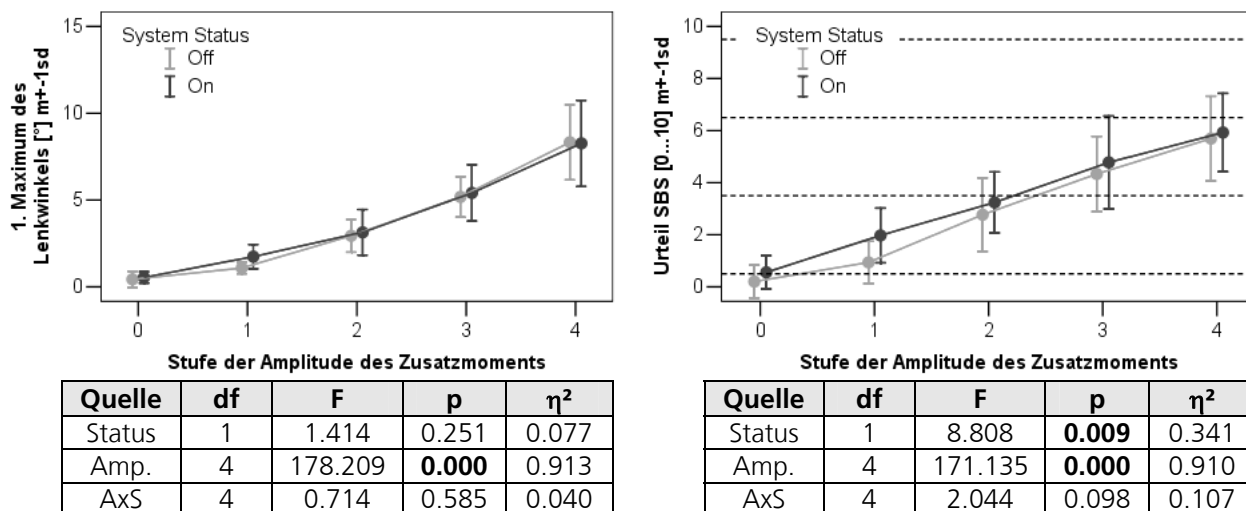


Abbildung 4-16: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für sprungförmige Zusatzmomente jeweils mit Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem.

Die Auswirkungen des Systemstatus bei rampenartigen Zusatzmomenten wird in Abbildung 4-17 betrachtet. Diese langsameren Zusatzmomente sind für den Fahrer erst bei größeren Lenkradwinkeln zu entdecken. Gleichzeitige Eingriffe durch ein Spurführungssystem verstärken diesen Effekt: Bei aktiver Spurführungsunterstützung treten höhere maximale Lenkradwinkel nach Aufschaltung des Zusatzmoments auf als ohne Assistenz. Die Fahrerreaktion erfolgt im Mittel ca. 150ms später und führt damit zu größeren maximalen Lenkradwinkelveränderungen sowie zu leicht erhöhten Gierreaktionen des Fahrzeugs. Es wird vermutet, dass dieser Effekt zu beobachten ist, weil das Zusatzmoment anfangs dem Regeleingriff der Spurführungsunterstützung ähnelt und damit für den Fahrer schlechter zu identifizieren ist. Die erhöhte Varianz unterstützt diese Erklärung. Aufgrund des erhöhten Automatisierungsgrades bei Assistenz ist allerdings auch möglich, dass sich die Fahreraufmerksamkeit verringert und die Kompensation der Zusatzmomente beeinträchtigt wird.

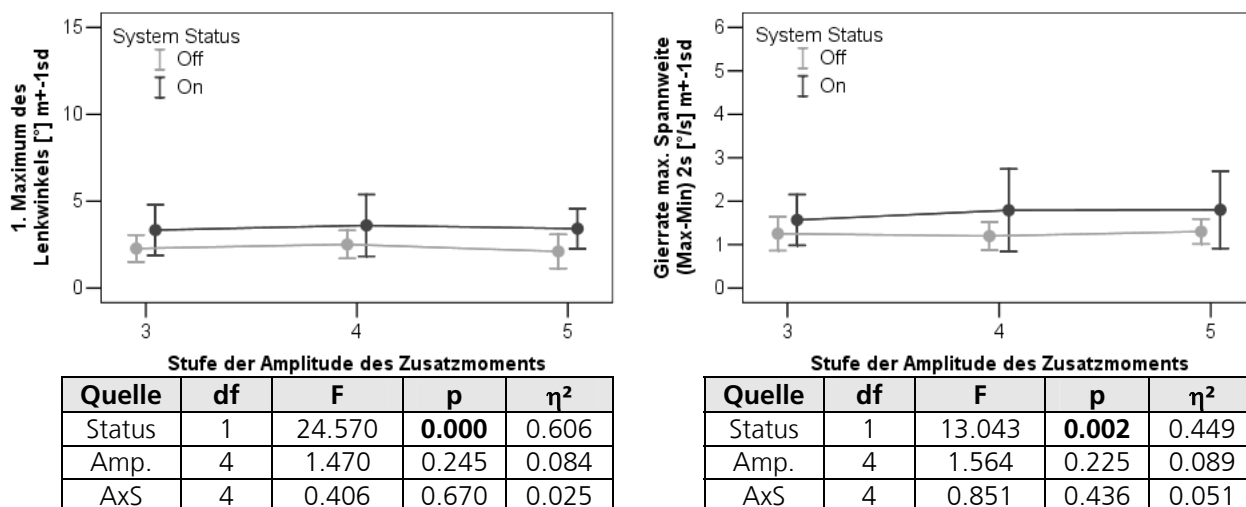


Abbildung 4-17: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und maximale Spannweite der Gierreaktion (rechts) für rampenartige Zusatzmomente. Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem.

Als Folge der Störungsaufschaltung mit aktivierter Spurführung sind größere Abweichungen des Fahrzeugs aus der Spurmitte zu beobachten (Abbildung 4-18 links). Die Abweichungen

bleiben jedoch in allen Fällen innerhalb der Fahrspur. Nichtsdestotrotz werden rampenförmige Zusatzmomente als störender eingestuft, wenn Spurführungsunterstützung bis zur Aufschaltung aktiviert war (Abbildung 4-18 rechts).

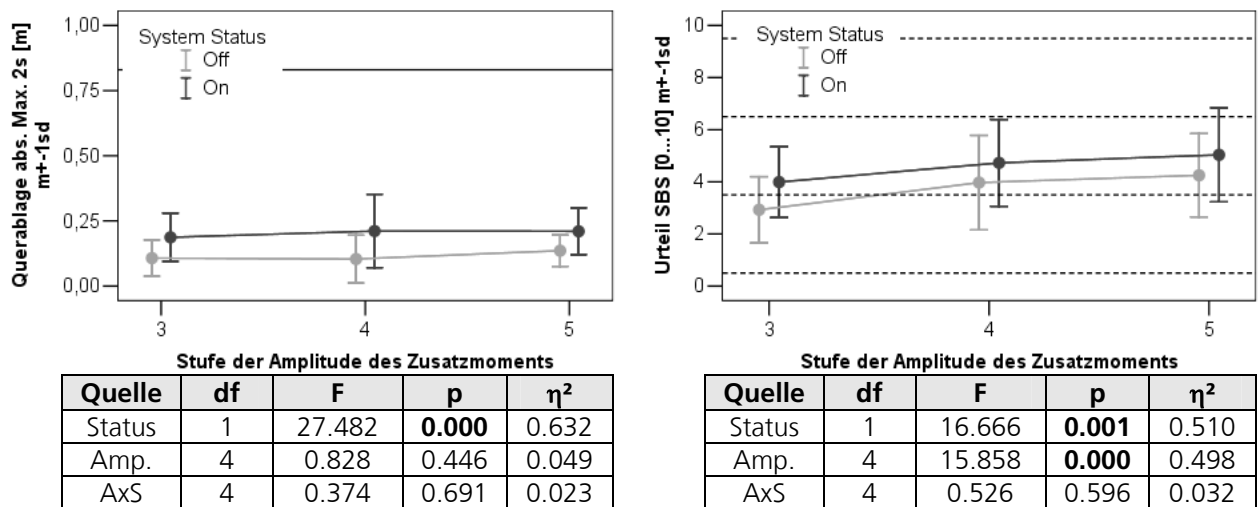


Abbildung 4-18: Querablage von der Spurmitte (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für rampenartige Zusatzmomente jeweils mit Aufschaltung bei aktiviertem vs. nicht-aktiviertem Spurführungssystem. Die Linie in der linken Abbildung bei 0.83m bezeichnet die zulässige Querabweichung bis zum Überfahren der Fahrspurbegrenzung.

4.3.3 Fahrzeugeigenschaften

Neben den Variationen auf Seiten des Manövers und des Fahrzeugzustandes wurden die Zusatzmomente bei unterschiedlichen Abstimmungen von Lenkung und Spurführungssystem dargeboten. Offen ist bislang, welchen Einfluss die Fahrzeugeigenschaften auf Bewertung und Reaktion durch den Fahrer haben. So führen ähnliche Lenkeingriffe in verschiedenen Fahrzeugen u. U. zu deutlich anderen Reaktionen des Fahrzeugs. Für die Auswirkungen von Zusatzmomenten ist dabei mindestens von zwei Moderatoren auszugehen: Einerseits das Ansprechverhalten des Lenkungsstrangs auf das Zusatzmoment als Vermittler der haptischen Information und andererseits die fahrdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs (Fahrzeugmodell) als Vermittler kinästhetischer Informationen. Beide erscheinen für den Fahrer wesentlich.

In einem ersten Ansatz wurde versucht, diese beiden Einflüsse zu isolieren und lediglich eines der beiden Übertragungsglieder zu verändern. In dem im Folgenden dargestellten Versuch (Studie 1, vgl. Abschnitt 3.3.1) wurden zwei Versuchsfahrzeuge eingesetzt, die sich in ihrer Lenkungsabstimmung unterschieden. Es handelt sich in beiden Fällen um Versuchsträger auf Basis eines VW Tourans. Während Fahrzeug A mit der Serienabstimmung der Lenkung fährt, besitzt Fahrzeug B eine erhöhte Steifigkeit in der Lenkung bei gleichzeitig stärkeren Momenteingriffen des Spurführungssystems. Verglichen werden hier ausschließlich Messungen mit aktivierter Spurführungsunterstützung. Die Spurführungssysteme waren so ausgelegt, dass sie das Fahrzeug über begrenzte Lenkungseingriffe stets in der Mitte der Fahrspur hielten. Der Fahrer hatte dabei die Hände am Lenkrad zu halten und das System zu überwachen. Die Zusatzmomente unterschiedlicher Amplituden wurden bei freier Geradeausfahrt und aktiviertem Spurführungssystem zugeschaltet. Dargestellt sind in diesem Abschnitt die Ergebnisse bei sprungförmigen Zusatzmomenten mit maximaler Anstiegssteilheit. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf 18 Versuchspersonen, die im Sinne eines Cross-over Designs nacheinander mit beiden Fahrzeugen gefahren sind (siehe Abschnitt 3.3.1).

Entsprechend der erhöhten Steifigkeit der Lenkung sind die Auswirkungen der Zusatzmomente bei der Fahrzeugabstimmung B weniger stark: Sowohl in Lenkungs- (Abbildung 4-19) als auch Fahrzeugparametern (Abbildung 4-20) zeigen sich mit steigender Stufe des angeforderten Lenkmoments geringere Werte gegenüber der Variante A.

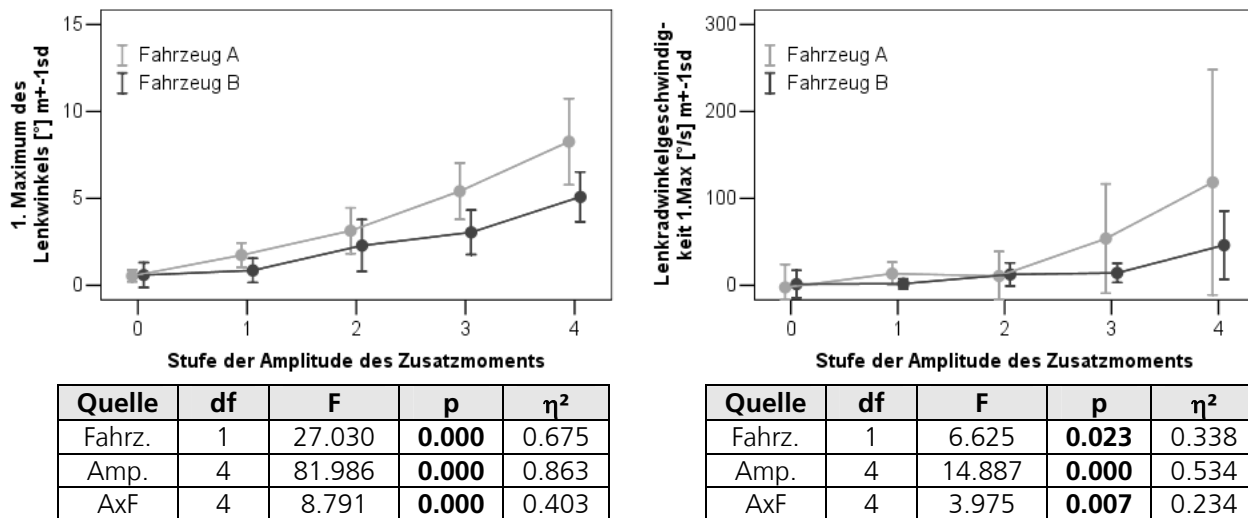


Abbildung 4-19: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und rel. Maximum in der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.

Zwar ist die Zeit bis zur Ausregelung der durch das Zusatzmoment entstehenden Gierreaktion in beiden Fahrzeugabstimmungen gleich lang, allerdings reagiert der Fahrer bei der Fahrzeugabstimmung B erst später (Abbildung 4-21 links). Der Fahrer benötigt damit insgesamt weniger Zeit zum Ausregeln des Zusatzmoments und bewertet die Störungsepisode als weniger beeinträchtigend (Abbildung 4-21 rechts).

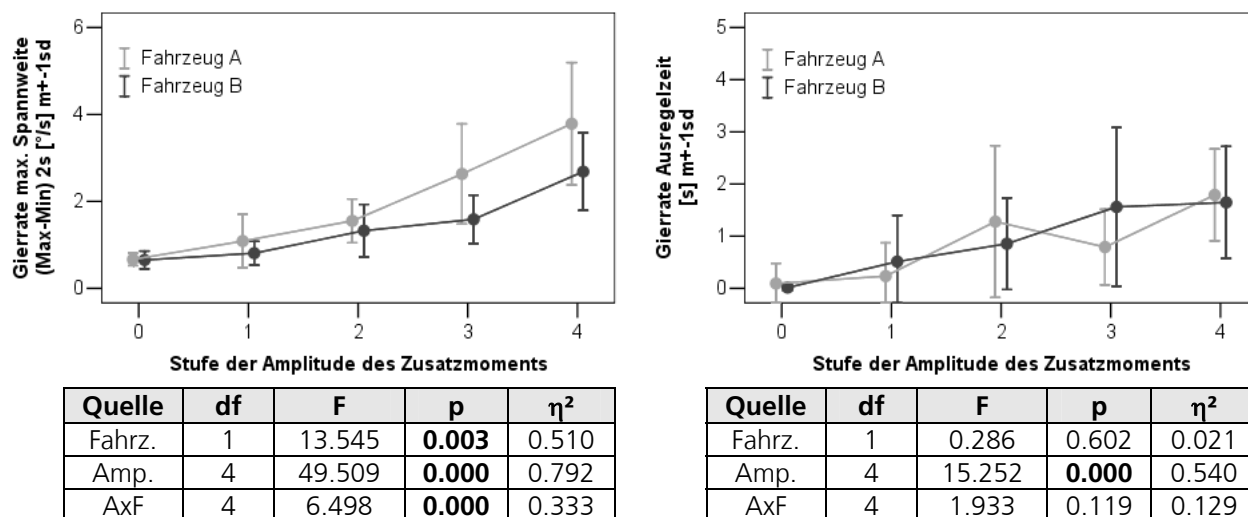


Abbildung 4-20: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und Ausregelzeit der Gierbewegung durch den Fahrer (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.

Durch die unterschiedliche Abstimmung der Lenkung und die höheren vorherigen Eingriffe durch das Spurführungssystem sind die Auswirkungen der Zusatzmomente damit in der Fahrzeugvariante mit höherer Steifigkeit der Lenkung geringer und werden vom Fahrer als weniger störend bewertet. Durch die Lenkungsabstimmung werden sowohl das haptische Signal für den Fahrer über die Lenkradbewegung als auch das kinästhetische über die resultierende Fahrzeugbewegung gleichzeitig verändert. Daher kann nicht eindeutig geklärt werden,

welche der beiden Signale die Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers beeinflusst. Allerdings ist zu vermuten, dass gleichstarke Lenkrad- und Fahrzeugbewegungen zu gleichen Bewertungen und Reaktionen führen. Für gleichstarke Fahrzeugreaktionen ist bei strafferer Lenkungsabstimmung allerdings ein höheres Zusatzmoment vonnöten. Dies unterstreicht, dass eine Betrachtung der Auswirkungen von Zusatzmomenten nie unabhängig vom Übertragungsverhalten des Fahrzeugs erfolgen kann und damit auch kaum verallgemeinerbar ist. Um den Einfluss des Fahrzeugmodells jedoch zu reduzieren, kann statt des angeforderten Moments der Zusammenhang zwischen auftretenden Lenk- und Fahrzeugreaktionen zur Bewertung durch den Fahrer hergestellt werden. Dieser Ansatz wird in Abschnitt Kapitel 5 näher betrachtet.

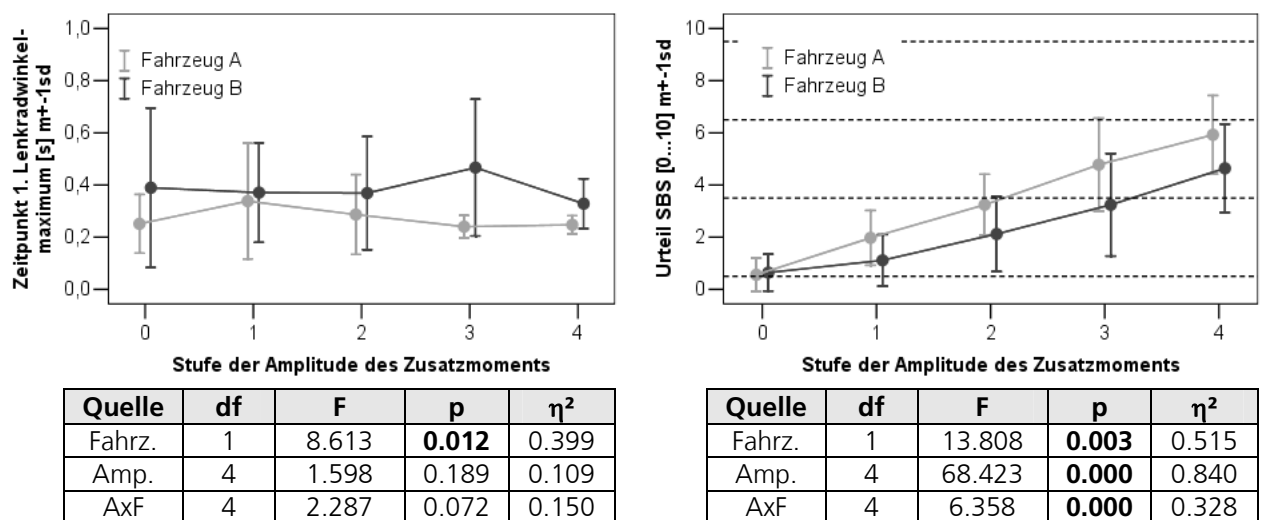


Abbildung 4-21: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für die Fahrzeugabstimmungen A und B.

4.3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der moderierende Einfluss der situativen Parameter Geschwindigkeit, aktivierte Spurführungsassistentz und Fahrzeugeigenschaften auf die Auswirkungen von zusätzlich aufgeschalteten Lenkmomenten bezüglich der Fahrerwahrnehmung und den folgenden fahrdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs betrachtet.

Die Geschwindigkeit zeigt in den hier untersuchten Abstufungen von 70 und 100km/h bei dem eingesetzten Fahrzeug keinen generellen Einfluss auf die Störungsauswirkungen durch Zusatzmomente. Die Reaktionen des Fahrzeugs auf die Zusatzmomente liegen in beiden Geschwindigkeitsstufen sehr nah beieinander. Damit stellt sich die für den Fahrer zu leistende Aufgabe der Ausregelung dieser Fahrzeugreaktionen in beiden Stufen gleichschwer dar. Als Grund für die ähnlichen Fahrzeugreaktionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten kann vermutet werden, dass die Grundabstimmung der Elektromechanischen Servolenkung derart gestaltet ist, dass sie den Einfluss der Geschwindigkeit auf das Übertragungsverhalten des Fahrzeugs zu minimieren versucht. Dies bedeutet weiter, dass die Wahrnehmung des Fahrers nicht durch die unterschiedliche Geschwindigkeit verändert wird. Denkbar wäre dies im Sinne einer allgemeinen Erhöhung der erlebten Kritikalität aufgrund einer erhöhten Geschwindigkeit. Offen bleibt an dieser Stelle, wie eine extremere Abstufung der Geschwindigkeit auf das Fahrer-Fahrzeug-System wirkt. Grundsätzlich kann bei höheren Geschwindigkeiten von einer

deutlich stärkeren Gierdämpfung des Fahrzeugs ausgegangen werden, die zu geringeren Fahrzeugreaktionen bei gleichen Anregungen über Zusatzlenkmomente führt. Dies bleibt jedoch experimentell zu belegen. Der untere Geschwindigkeitsbereich kann im Wesentlichen als unkritisch angenommen werden. Auch hier treten kaum stärkere Reaktionen des Fahrzeugs auf und gleichzeitig besitzt der Fahrer bei geringen Geschwindigkeiten mehr Zeit zum Ausregeln einer Störung.

Weiter wurde die Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente bei gleichzeitig eingreifender Spurführungsassistenz untersucht. Hierzu werden bei kontinuierlich aktiv regelndem Spurführungssystem stärkere Zusatzmomente als Störungen überlagert. Fraglich ist, ob der Fahrer diese Störungen vergleichbar gut ausregelt, wie bei nicht aktiver Systemunterstützung. So kann vermutet werden, dass sich der Fahrer durch einen höheren Grad an Automatisierung aus der Aufgabe leicht zurückzieht und Störungen weniger schnell erkennt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass Lenkungseingriffe über Zusatzmomente ein geeignetes Mittel zur Umsetzung eines Spurführungsassistenten darstellen. Ein Fahrzeug kann, sofern die optimale Spurposition des Fahrzeugs über geeignete Sensorik bestimmt wird, über die Aufschaltung zusätzlicher Momente auf dieser optimalen Position in der Spur gehalten werden. Fraglich ist, wie der Fahrer in dieser Situation auf starke zusätzliche Eingriffe reagiert, die das Fahrzeug von dieser Idealposition abbringen. Im Hinblick auf die Kontrollierbarkeit eines solchen Systems ist zu gewährleisten, dass der Fahrer unter allen möglichen Umständen hierzu in der Lage ist.

Erstaunlicherweise unterscheiden sich die Eingriffe und Bewertungen des Fahrers bei starken, sprungförmigen Zusatzmomenten nicht generell von denen bei nicht-aktivierter Spurführungsassistenz. Die Signale erscheinen derart überschwellig und deutlich, dass der Fahrer diese unabhängig von der vorherigen Spurführungsassistenz als Störungen wahrnimmt und ausregelt. Demgegenüber werden rampenartig ansteigende Zusatzlenkmomente durch die aktive Spurführungsassistenz erst später entdeckt. Daraus resultieren etwas erhöhte Fahrzeugreaktionen, die der Fahrer entsprechend störender bewertet. Das spätere Eingreifen kann signalentdeckungstheoretisch erklärt werden: Die beständigen Regeleingriffe des kontinuierlich arbeitenden Systems erhöhen das Rauschen im Lenkrad. Darüberliegende ähnliche Signale, wie die rampenartig ansteigenden Zusatzmomente, können dann weniger gut und schnell identifiziert werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei dem eingesetzten Spurführungssystem um ein kontinuierlich eingreifendes System handelt, das das Fahrzeug beständig auf der Spurmitte zu halten versucht. Denkbar sind auch Systeme, die eine Unterstützung der Spurhaltung erst an den Rändern der Fahrspur liefern und diskret eingreifen. Die Querregelungsaufgabe verbleibt in diesem Fall stärker beim Fahrer: Solange ein definierter Schlauch um die Mitte der Fahrspur nicht verlassen wird, greift das System nicht ein. Für solche Systeme sind die Auswirkungen der Zusatzmomente eher mit dem Fall eines nicht aktivierten Systems zu vergleichen, sofern sie innerhalb dieses Fahrschlaches auftreten.

Die Variation der Fahrzeugeigenschaften über die Modifikation von Lenkungsparametern und der Ausgestaltung eines Spurführungssystems zeigt dagegen einen wesentlichen Einfluss bei Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomentsignale. Die Erhöhung der Steifigkeit der Lenkung bei gleichzeitig stärkeren Eingriffen durch ein Spurführungssystem in einem der beiden ansonsten gleichen Versuchsfahrzeuge verringert die Störungsauswirkungen durch die Zusatzsignale. Dementsprechend reagiert der Fahrer weniger heftig und bewertet die Störungen als weniger

stark. Damit zeigt sich, dass die Untersuchung der Auswirkungen von Lenkeingriffen nicht unabhängig vom Fahrzeug erfolgen kann. Gleichzeitig wird damit die Generalisierbarkeit der Ergebnisse aus einem einzelnen Fahrzeug auf andere stark eingeschränkt. Beachtenswert erscheint, dass durch die Variation der Fahrzeugeigenschaften alle hier betrachteten Parameter auf Seiten der Fahrzeugreaktion und des Fahrers gleichartig beeinflusst werden. Es kann also vermutet werden, dass gleiche Zusatzmomente in unterschiedlichen Fahrzeugen zwar unterschiedliche Fahrzeugreaktionen hervorrufen, aber gleiche Auswirkungen der Zusatzmomente durchaus ähnlich vom Fahrer bewertet werden. In diesem Fall sollte es möglich sein, die Fahrerreaktion und -bewertung über die hervorgerufenen Fahrzeugreaktionen zu schätzen. Dieser Zusammenhang sollte unabhängig vom untersuchten Fahrzeug und damit generalisierbar sein. Der Einfluss des Fahrzeugs wird dann über den Zusammenhang zwischen aufgeschaltetem Zusatzmoment und den daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen abgebildet. Dieser Zusammenhang lässt sich entweder über Simulation oder im open-loop Versuch mit vergleichsweise geringem Aufwand ermitteln und kann dann in Relation zum hier untersuchten Fahrzeug gestellt werden, um Grenzwerte für ein weiteres Fahrzeug zu bestimmen (siehe Kapitel 5). Tabelle 4-3 fasst die zentralen Aussagen dieses Abschnitts in Kurzform zusammen.

1	Die Variation der Geschwindigkeit in dem untersuchten Bereich von 70 und 100km/h führt hier nicht zu unterschiedlichen Störungsauswirkungen oder Bewertungen.
2	Bei der Aufschaltung sprungförmiger Zusatzmomente spielt es nach den Ergebnissen dieser Arbeit keine Rolle, ob ein kontinuierliches Spurführungssystem vorher aktiv war. Solche Störungssignale werden trotz des erhöhten Automatisierungsgrades vom Fahrer schnell und sicher wahrgenommen.
3	Rampenartige Zusatzmomente werden bei aktivierter kontinuierlicher Spurführung erst später detektiert und aufgrund daraus resultierender stärkerer Fahrzeugreaktionen als störender bewertet.
4	Die Ergebnisse aus dem Vergleich unterschiedlicher Lenkungsabstimmungen zeigen deutlich den Einfluss der Eigenschaften des Fahrzeugs auf Wahrnehmung und Bewertung der Zusatzmomente.
5	Zwar erscheinen die Ergebnisse eines Fahrzeugs nicht direkt auf weitere Fahrzeuge übertragbar, es kann allerdings vermutet werden, dass gleiche Fahrzeugreaktionen auch in unterschiedlichen Fahrzeugen zu ähnlichen Bewertungen und Fahrerreaktionen führen (siehe Kapitel 5).

Tabelle 4-4: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zu situativen Parametern.

4.4 Einfluss der Signalparameter: Der Zielkonflikt von Amplitude und Anstiegssteilheit des Zusatzmoments

Von Interesse ist an dieser Stelle insbesondere die Beschreibung der Einflussfaktoren auf Signalseite. Über die Variation der Amplitude der Zusatzmomente wird versucht, den Zusammenhang zu objektiven und subjektiven Parametern der Fahrsicherheit zu beschreiben. Im Fokus liegt insbesondere die Überprüfung der in einer Simulationsumgebung gewonnenen Störungsschwellen [GSN+05]. Über die Variation der Anstiegsgeschwindigkeit der Zusatzmomente soll geklärt werden, wie stark der Einfluss dieses Faktors auf Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers ist. Dabei wird angenommen, dass eine geringere Anstiegsgeschwindigkeit bei gleicher Amplitude weniger stark bewertet wird.

Für die Anwendung im Spurführungssystem sind diese beiden Parameter von entscheidender Bedeutung. Die Höhe der zulässigen Amplitude bestimmt den maximal anforderbaren Lenkeinschlag und ist damit maßgeblich für die Leistung des Systems verantwortlich. Die Anstiegssteilheit beschreibt demgegenüber die Dynamik des Eingriffs. Je früher ein angefordertes

Lenkmoment aufgebaut wird, desto schneller und präziser kann das Fahrzeug eingeregelt werden. Allerdings ist für den Einsatz in Spurführungssystemen keine größtmögliche Dynamik erforderlich.

Die Betrachtung der hier untersuchten Faktoren der Signalgestaltung Amplitude und Anstiegssteilheit erfolgt in den Studien 1, 2 und 4 (Abbildung 4-22). Während die Variationen aus Studie 1 einer prinzipiellen Abschätzung des Einflusses von Amplitude und Anstiegssteilheit liefern (Abschnitt 4.4.1), fokussiert Studie 2 den Trade-off dieser beiden Faktoren (Abschnitt 4.4.2). Über Studie 4 erfolgt der Versuch einer Validierung der Ergebnisse im Realfahrzeug (Abschnitt 4.4.3).

	Studie 1 Signalparameter & situative Faktoren	Studie 2 Anstiegssteilheit des Zusatzmoments	Studie 3 Fahrsituation & Alterseffekte	Studie 4 Replikation & Validierung
Kapitel 4.1 Einfluss des Fahrmanövers	Gerade Kurve	Gerade	Engstelle Kurve Spurwechsel	Engstelle Kurve Spurwechsel
Kapitel 4.2 Vergleich verschiedener Fahrergruppen	Jüngere Fahrer Normalfahrer	Normalfahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer	Jüngere Fahrer Normalfahrer Ältere Fahrer
Kapitel 4.3 Situative Faktoren & Fahrzeugparameter	Geschwindigkeit Spurführungssystem Fahrzeuge A & B	Simulatormodell	Fahrzeug C	Fahrzeug C
Kapitel 4.4 Variation der Signalparameter	Amplitude Steilheit	Amplitude Steilheit	Amplitude	Steilheit

Abbildung 4-22: Übersicht der in diesem Abschnitt 4.4 betrachteten Studien mit den jeweils variierten Faktoren.

4.4.1 Auswirkungen der Amplitude bei unterschiedlichen Anstiegssteilheiten

Die Versuche wurden mit einem Versuchsträger der Volkswagen AG auf dem Testgelände in Ehra-Lessien mit 18 Probanden durchgeführt (Studie 1, vgl. 3.3.1). Zusätzliche Lenkmomente wurden bei Geradeausfahrt mit 100km/h über die EPS aufgeschaltet. Es wurden den Versuchspersonen Zusatzmomente der Amplitudenstufen 0, 1, 2, 3, 4 mit maximaler Anstiegssteilheit (Sprung) und die Amplitudenstufen 3, 4 und 5 mit stark begrenzter Anstiegssteilheit (Gradient) je dreifach wiederholt dargeboten. Für die Amplitudenstufen gilt hinsichtlich des maximal angeforderten Lenkmoments $0 < 1 < 2 < 3 < 4 < 5$. Für eine genauere Beschreibung des Versuchsdesigns sei auf Abschnitt 3.3.1 verwiesen.

Die im Versuch dargebotenen beiden unterschiedlichen Fehlertypen „Rampe“ und „Sprung“ unterscheiden sich in der Anstiegsgeschwindigkeit des Zusatzmoments. Direkt vergleichbar sind hierzu Zusatzmomente einer Amplitude von Stufe 3 und 4, die in beiden Bedingungen dargeboten wurden (Abbildung 4-23).

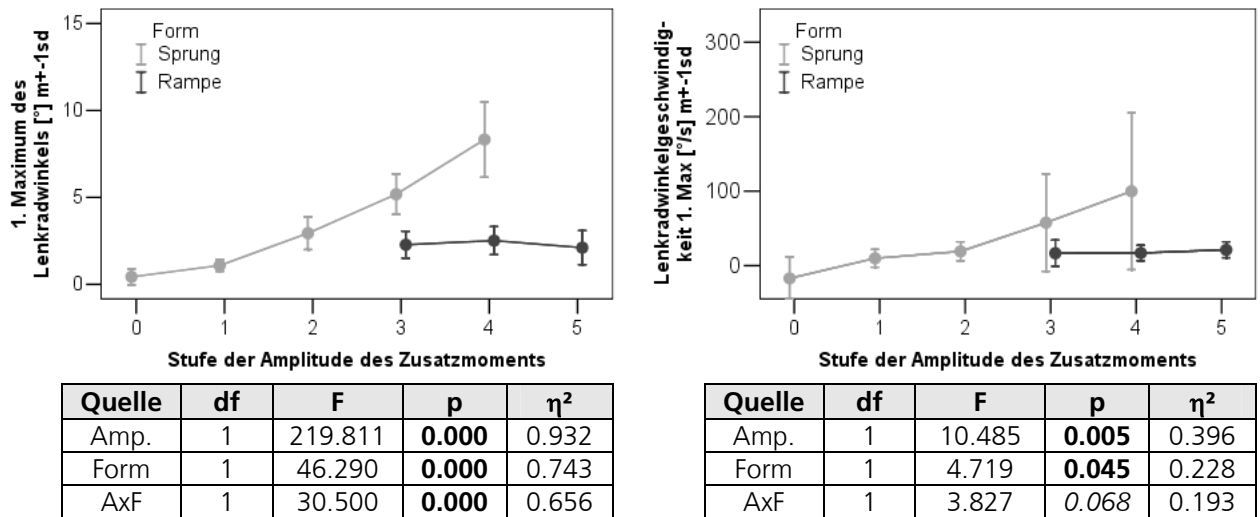
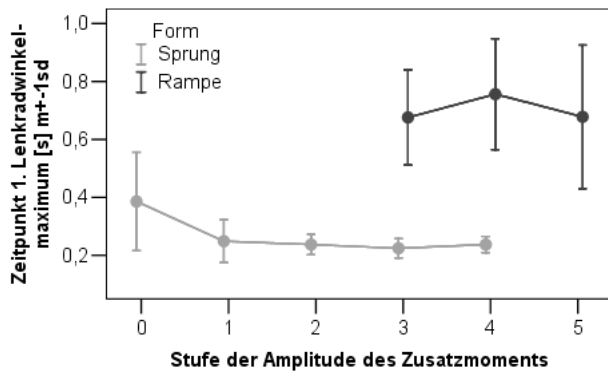


Abbildung 4-23: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und rel. Maximum in der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) für Zusatzmomente „Sprung“ und „Rampe“.

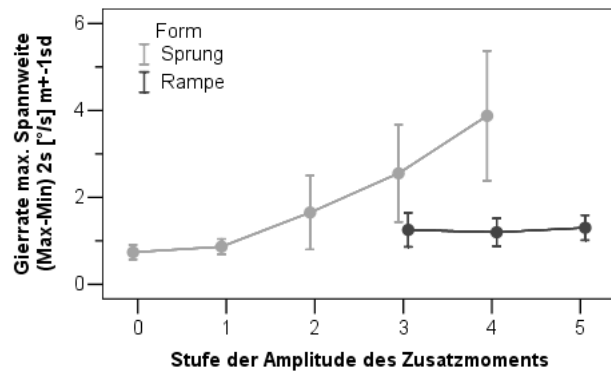
Mit zunehmender Amplitude des Zusatzmoments steigt das Maximum im Lenkradwinkel in der Bedingung „Sprung“ signifikant an. Bei langsamerem Aufbau des Zusatzmoments zeigt sich erwartungsgemäß ein signifikant geringeres erstes Maximum des Lenkradwinkels als bei steilerem Anstieg. Während das durch das Zusatzmoment hervorgerufene Lenkradwinkelmaximum bei sprunghaftem Anstieg zunimmt und bei Zusatzmomenten von 4 im Mittel 8.32° ($sd=2.16^\circ$) erreicht, bleibt dieses in der Bedingung „Rampe“ beinahe konstant und stets unterhalb von 2.60° . Die durch das Zusatzmoment hervorgerufene Änderung ist demnach selbst bei einer Amplitude Stufe 5 geringer als bei sprunghafter Darstellung von 2 ($m=2.94^\circ$; $sd=0.94^\circ$).

Die Betrachtung der Zeitpunkte des ersten Lenkradwinkelmaximums als Schätzer der Reaktionszeit des Fahrers zeigt deutlich erhöhte Werte bei den langsam ansteigenden Zusatzmomenten der Bedingung Rampe (Abbildung 4-24). Im Mittel liegen die Zeitpunkte bei $m=702ms$ ($sd=203ms$) und setzen sich deutlich von den Reaktionen bei sprunghaft dargebotenen Momenten ab, die mit zunehmender Amplitude gegen $220ms$ konvergieren. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass dieses Maß erstens einen konservativen Schätzer darstellt, da der Fahrer im Maximum des Lenkradwinkels das Lenkrad aktiv in die Gegenrichtung bewegt. Die eigentliche Reaktion einschließlich des Abbremsens der Bewegung des Lenkrads, die durch das Zusatzmoment verursacht wurde, setzt dagegen noch früher ein. Allerdings ist dieser Punkt nicht einwandfrei identifizierbar.

Deutlich unterschiedlich zeigen sich die Auswirkungen der Zusatzmomente auf die Fahrzeugreaktion. Während die Gierreaktion bei Zusatzmomenten mit sprunghaftem Anstieg proportional zur Amplitude zunimmt und bei Amplitude Stufe 4 eine maximale Spannweite von $m=3.88^\circ/s$ ($sd=1.49^\circ/s$) erreicht, führen Zusatzmomente mit geringerer Steigung zu einer deutlich verringerten Gierreaktion, die von der Amplitude unabhängig ist ($m=1.25^\circ/s$; $sd=0.33^\circ/s$) (Abbildung 4-24).



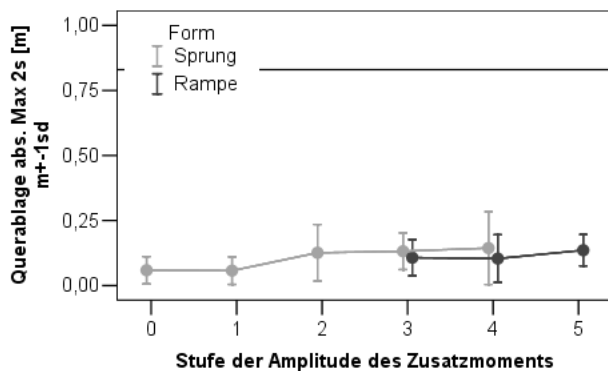
Quelle	df	F	p	η^2
Amp.	1	210.914	0.000	0.929
Form	1	3.933	0.065	0.197
AxF	1	1.715	0.209	0.097



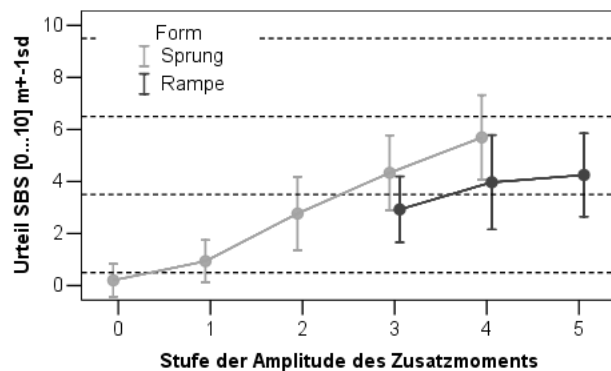
Quelle	df	F	p	η^2
Amp.	1	49.518	0.000	0.756
Form	1	18.247	0.001	0.533
AxF	1	22.432	0.000	0.584

Abbildung 4-24: Zeitpunkt des 1. Lenkradwinkelgeschwindigkeitsmaximums (links) und der maximalen Spannweite der Gierrate (rechts) für „Sprung“ und „Rampe“.

Die maximale Querablage, die nach Applikation eines Zusatzmoments erreicht wird, ist für beide Fehlerarten gleich gering. So zeigen sich selbst bei den stärksten Zusatzmomenten im Mittel keine größeren Abweichungen als 15cm von der Ausgangsposition des Fahrzeugs bei Auslösen des Zusatzmoments (Abbildung 4-25). Bei perfekter Positionierung des Fahrzeugs in der Fahrbahnmitte zum Auslösezeitpunkt bleiben dem Fahrer unter Berücksichtigung der Fahrzeugabmessungen und der Spurbreite von 3.5m noch 0.83m bis zur Erreichung der Spurmarkierungen. Von solchen Größenordnungen sind die Fahrer deutlich entfernt.



Quelle	df	F	p	η^2
Amp.	1	1.606	0.223	0.091
Form	1	0.681	0.421	0.041
AxF	1	0.382	0.545	0.023



Quelle	df	F	p	η^2
Amp.	1	54.688	0.000	0.774
Form	1	42.772	0.000	0.728
AxF	1	1.486	0.240	0.085

Abbildung 4-25: Maximale Querablage (links) und Bewertung der Auswirkungen des Zusatzmoments (rechts) für „Sprung“ und „Rampe“.

Die Betrachtung der Beurteilung der Auswirkungen der Zusatzmomente durch den Fahrer spiegelt die Ergebnisse aus den fahrphysikalischen Parametern wider. Bei sprunghaftem Anstieg der Zusatzmomente werden deren Auswirkungen ab einer Amplitude von 3 mit $m=4.33$ ($sd=1.35$) als störend bewertet (Abbildung 4-25). Bei einer Amplitude Stufe 4 treten Urteile im Bereich „gefährlich“ auf. Zusatzmomente, die zu solchen Bewertungen führen, sind in jedem Fall im Fahrzeug zu vermeiden. Bei langsamerem Anstieg führt ein Zusatzmoment zu geringeren Bewertungen. Insgesamt erreicht das Zusatzmoment bei langsamerem Anstieg auch bei Amplitude 5 ($m=4.25$; $sd=1.60$) in den hier untersuchten Situationen nicht den Bereich „gefährlich“ auf der Skala. Allerdings können schon die geringsten dargestellten

Zusatzmomente mit Amplitude der Stufen 2 bzw. 3 zu einem Urteil der Kategorie „Störung des Fahrens“ führen.

Insgesamt zeigt sich damit, dass die Amplitude den Hypothesen entsprechend einen starken Einfluss auf die Fahrerreaktion und -bewertung besitzt, sofern die Zusatzmomente sprunghaft dargeboten werden. Ein Anstieg der Amplitude ist gleichbedeutend mit einer Verschärfung der hervorgerufenen Störung. Beachtenswert erscheint die schnelle Reaktionszeit der Normalfahrer im Bereich von 200ms auf starke, sprunghaft dargebotene Zusatzmomente. Diese Werte liegen weit unter der häufig in der Literatur als „Schrecksekunde“ bezeichneten Reaktionszeit eines Fahrers. Es zeigt sich über diese sehr schnellen, beinahe reflexartigen Bewegungen, dass der Fahrer durchaus in der Lage ist, schneller zu reagieren. Dabei ist die Reaktion der Situation angemessen. Ein Aufschaukeln durch den Fahrer kann hier nicht beobachtet werden. In Bezug zur Literatur zur Bewegungssteuerung des Menschen [Sch88] ist bei dieser Reaktionsgeschwindigkeit von schnellen, gesteuerten Bewegungen auszugehen, die in ihrem weiteren Verlauf durch eine rückgekoppelte, geregelte Bewegungssteuerung überlagert und präzisiert wird. Weiterhin kann im Sinne des Modells multipler Ressourcen von [Ras83] und den Befunden zur Reiz-Reaktions-Kompatibilität [FS53; Str93; LP95] vermutet werden, dass die schnelle Antwort aufgrund der Kompatibilität von Eingabe und Ausgabe zustande kommt. Gleichzeitig handelt es sich um hochgradig automatisierte Bewegungen. Das Führen eines Fahrzeugs und das Ausgleichen von fahrdynamischen Störungen in der Lenkung z.B. durch Fahrbahnunebenheiten oder Seitenwind stellt für den geübten Fahrer eine bekannte Aufgabe dar. In diesem Fall gilt es lediglich Parameter von bereits vorhandenen und geübten Handlungsschemata anzupassen [Ras83] (siehe Abschnitt 2.3.3). Auch dies fördert ein schnelles Reagieren.

Deutlich anders stellen sich die Ergebnisse bei den mit geringen Anstiegsgradienten gestellten sprunghaften Zusatzmomenten dar. Zwar werden Störungen dieser Form auch mit steigender Amplitude als störender bewertet, allerdings kann in fahrdynamischen und Lenkparametern ein solcher Zusammenhang nicht bestätigt werden. Vielmehr bleiben die Fahrzeug- und Lenkreaktionen bei sprunghaften Zusatzmomenten aller untersuchten Amplituden im Bereich derer der sprunghaften Momente mit Amplitudenstufe 2. Auffällig ist, dass der maximale durch das Zusatzmoment hervorgerufene Lenkradwinkel 3° nicht überschreitet. Dieser Wert steht im Einklang zu den Ergebnissen von [GSN⁺05], die Zusatzlenkmomente als dann störend identifiziert haben, sobald diese zu Veränderungen im Lenkradwinkel größer 3° führen. Damit erscheinen Zusatzlenkmomente mit einem weniger steilen Anstieg selbst bei großen Amplituden für den Fahrer zumutbar ohne die Fahrsicherheit zu beeinträchtigen. Es bleibt zu klären, wie sich der Zusammenhang zwischen Anstiegssteilheit und maximaler Amplitude zwischen diesen beiden hier untersuchten extremen Ausprägungen gestaltet. Eine genauere Untersuchung dieser Frage erfolgt im nachstehenden Abschnitt.

4.4.2 Trade-off von Anstiegssteilheit und Amplitude des Zusatzlenkmoments

Im vorangegangenen Abschnitt konnte gezeigt werden, dass eine Verringerung des Gradienten eines Zusatzmoments bei konstanter Amplitude zu signifikant schwächeren Fahrzeugreaktionen und einer geringeren Bewertung der Störung durch die Aufschaltung des Zusatzmo-

ments führt. Umgekehrt kann behauptet werden, dass Zusatzmomente mit höheren Amplituden für den Normalfahrer genau dann beherrschbar bleiben, wenn die Anstiegssteilheit beim Aufbau des Zusatzmomentes angemessen begrenzt ist.

In der in diesem Abschnitt dargestellten Studie wird diese Hypothese aufgegriffen und geprüft. Es wird der Versuch unternommen, die Interaktion von Anstiegssteilheit (Gradient) und Amplitude über die experimentelle Variation dieser beiden Signalgrößen zu beschreiben. Diese beiden Signalparameter repräsentieren die Dynamik und die Stärke der Störung. Eingeschlossen sind Fragen über den jeweiligen Einfluss von Amplitude und Gradient eines Zusatzmoments auf die Wahrnehmung und Bewertung durch den Fahrer als unabhängige Einzelfaktoren. Weiter kann aufgrund der bisherigen Ergebnisse angenommen werden, dass der formulierte Zusammenhang von Amplitude und Gradient unterhalb eines bestimmten Gradienten vernachlässigbar wird. Sofern der Gradient unterhalb einem bestimmten Grenzwert liegt, sollte der Einfluss der Amplitude verschwinden. Bei steilen Gradienten sollte der Zuwachs des Zusatzmomentes so schnell passieren, dass aufgrund der Tot- und Ausregelzeit des Fahrers ein vollständiges Kompensieren der Regelabweichung nicht mehr möglich ist. Jeder Anstieg des angeforderten maximalen Lenkmoments führt unter diesen Annahmen zu stärkeren Auswirkungen in den fahrdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs. Bei einem ausreichend geringen Gradienten sollte der Fahrer dagegen in der Lage sein, die Regelabweichung direkt zu kompensieren. Regelabweichungen durch Regelfehler seien an dieser Stelle der Anschaulichkeit halber vernachlässigt. Eine Zunahme der applizierten Amplitude würde in diesem Fall lediglich zu einer Verlängerung der Zeit führen, in der eine Kompensation durch den Fahrer notwendig ist. Aber größere Abweichungen sind nicht zu erwarten. Sofern diese Hypothese durch die nachfolgenden Ergebnisse untermauert werden kann, würde dieser spezifische Gradient Zeitverzug und motorische Fähigkeiten bei zusätzlich aufgeschalteten Lenkmomentensignalen beschreiben. Für die Anwendung in Fahrerassistenzsystemen würde eine Limitierung der Anstiegssteilheit auf diesen Gradienten gewährleisten, dass die Kontrollierbarkeit des Assistenzsystems selbst bei der Aufschaltung großer Amplituden nicht verringert wird.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnisse entstammen einer Untersuchung von 20 Versuchspersonen im Fahrsimulator ohne Bewegungssystem des Department of Mechanical Engineering der Stanford University. Der Fahrer wurde bei Geradeausfahrt mit Zusatzmomenten in drei Amplituden A, B und C konfrontiert und musste deren Auswirkungen kompensieren. Dabei gilt $A < B < C$. Diese Amplituden gleichen den Amplituden 2, 3 und 4 der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Untersuchung (Studie 1). Jede dieser Amplituden wird mit vier Gradienten I, II, III und IV gestellt. Hierbei gilt $I < II < III < IV$. Gradient I gleicht dem Gradienten der rampenartig mit begrenzter Anstiegssteilheit gestellten Zusatzmomente in Studie 1. Gradient IV ist weniger steil als der Gradient der sprungförmigen Zusatzmomente dort. Insgesamt werden damit zwölf Signale dem Fahrer je zweimal wiederholt dargeboten. Für eine genauere Beschreibung des Versuchs sei auf Abschnitt 3.3.2 verwiesen.

Abbildung 4-26 zeigt den Einfluss des Zusatzmoments auf die Bewertung der Störungsauswirkungen durch den Fahrer anhand der Störungsbewertungsskala. Mit zunehmender Amplitude des Zusatzmoments steigen die Bewertungen an ($p_{amp} < 0.001$; $\eta^2 = 0.681$; LSD: $p_{A-B} = 0.002$; $p_{B-C} < 0.001$). Zusätzlich ist die Höhe der subjektiven Bewertung abhängig von dem Gradienten des Momentensignals. Je steiler die Anstiegssteilheit, desto störender werden die

Auswirkungen der Zusatzmomente bewertet ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.706$; LSD: $p_{\text{I-II}} < 0.001$; $p_{\text{II-III}} = 0.028$; $p_{\text{III-IV}} = 0.005$). Während die Fahrer die Zusatzmomente mit Gradient I im Mittel über alle gestellten Amplituden als „spürbar“ bewerten, werden Zusatzsignale mit Gradient IV über alle Amplituden als „Störung beim Fahren“ eingestuft. Interaktionseffekte sind lediglich tendenziell zu beobachten ($p_{\text{amp} \times \text{grad}} = 0.084$; $\eta^2 = 0.092$).

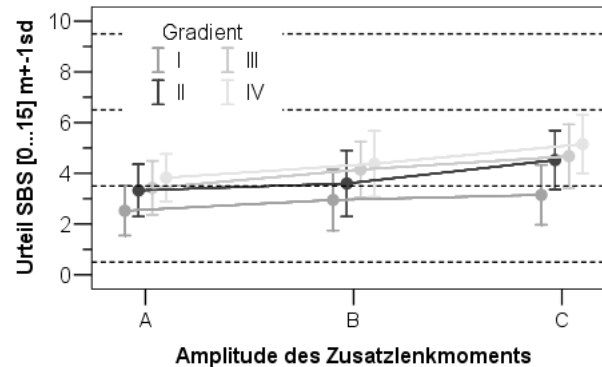


Abbildung 4-26: Subjektive Bewertungen der Störungsauswirkungen durch die Zusatzmomente pro Amplitude und Gradient.

Das erste Maximum des Lenkradwinkels nach Auslösung des Zusatzmoments beschreibt den Einfluss des Zusatzmoments auf das Fahrzeug, bevor der Fahrer kompensierend eingzugreifen versucht. Wie in Abbildung 4-27 (links) zu sehen ist, liefert dieser Parameter ein deutlich komplexeres Bild als die subjektiven Bewertungen: Obwohl der Gradient auch hier einen generellen Einfluss besitzt und das Maximum des Lenkradwinkels mit steilerem Gradienten ansteigt ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.787$; LSD: $p_{\text{I-II}} < 0.001$; $p_{\text{II-III}} = 0.007$; $p_{\text{III-IV}} < 0.001$), kann der generelle Effekt der Amplitude aufgrund der signifikanten Wechselwirkung nicht unterstützt werden ($p_{\text{amp} \times \text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.204$). Post-hoc Analysen dieser signifikanten Interaktion zeigen, dass die Amplitude für den geringsten Gradienten I keinen Effekt besitzt (Tabelle 4-5). Lediglich in Kombination mit dem steilsten Gradienten IV führt eine Erhöhung der Amplitude zu stärkeren Auswirkungen auf die Lenkung. Die Lenkmomentsignale mit den Gradienten II und III zeigen eine Abhängigkeit des maximalen Lenkradwinkels zumindest für zwei der drei Amplitudenstufen. Dies zeigt eindeutig, dass der Einfluss der Amplitude mit Verringerung des Gradienten abnimmt.

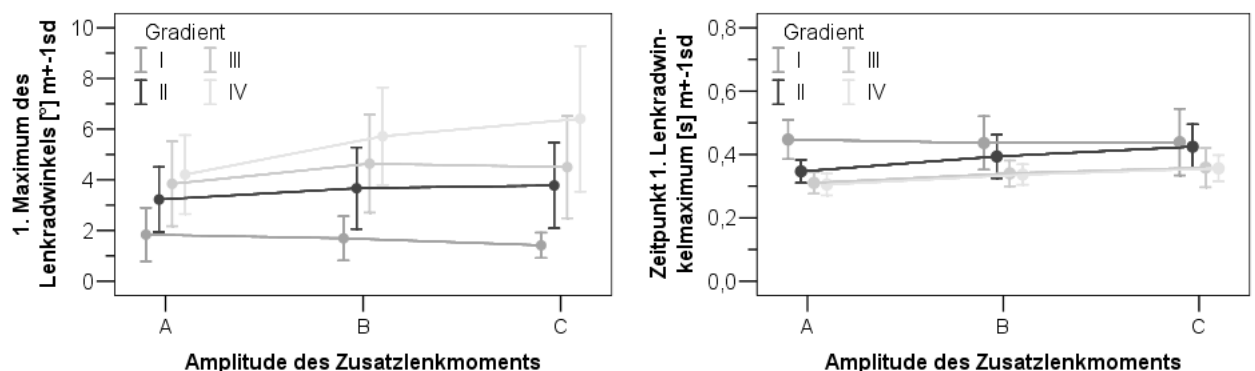


Abbildung 4-27: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und dessen Zeitpunkt (rechts) pro Gradient und Amplitude des Zusatzmoments.

Ein Blick auf den Zeitpunkt des ersten Maximums des Lenkradwinkels als Schätzer für die Reaktionszeit des Fahrers unterstreicht die Ergebnisse für die Stärke der Effekte auf das Lenksystem. Abbildung 4-27 (rechts) zeigt, dass sich die Reaktionszeit mit zunehmendem

Gradienten verringert. Für den Anstieg von Gradient III zu Gradient IV kann dieser Zusammenhang allerdings nicht bestätigt werden ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.739$; LSD: $p_{\text{I-II}} = 0.001$; $p_{\text{II-III}} < 0.001$; $p_{\text{III-IV}} < 0.520$). Die Amplitude kann auch bezüglich der Reaktionszeit des Fahrers nicht als genereller Einflussfaktor angesehen werden ($p_{\text{amp} \cdot \text{grad}} = 0.024$; $\eta^2 = 0.118$). Obwohl die Amplitude für die Gradienten II, III und IV zu längeren Reaktionszeiten führt, besitzt sie für Gradient I keinen Einfluss (Tabelle 4-5). Überraschenderweise erscheinen die Reaktionszeiten bei größeren Amplituden länger. Denkbar ist, dass der Fahrer bei größeren Amplituden mehr Zeit benötigt, um dieses stärkere Signal zu überwinden.

Abbildung 4-28 (links) zeigt die maximale Lenkradwinkelgeschwindigkeit nach dem ersten Lenkradwinkelmaximum. Dieser Parameter beschreibt die Heftigkeit der Fahrerreaktion auf die Zusatzmomente. Die beobachteten Reaktionen auf das Zusatzlenkmoment liegen für alle gestellten Amplituden und Gradienten unter 100%/s. Damit liegen die Reaktionen weit unter den Grenzen motorischer Leistungsfähigkeit von Normalfahrern. Mit zunehmendem Gradienten steigt auch die Heftigkeit der Fahrerreaktionen ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.757$; LSD: $p_{\text{I-II}} < 0.001$; $p_{\text{II-III}} < 0.001$; $p_{\text{III-IV}} = 0.006$). Der Gradient ist der Haupteinfluss auf die Fahrerreaktion. Wieder zeigt sich ein signifikanter Interaktionseffekt von Amplitude und Gradient ($p_{\text{amp} \cdot \text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.240$). Darüber hinaus verringert sich die Reaktion des Fahrers mit steigender Amplitude bei den geringeren Gradienten, während für Gradient IV die Lenkradwinkelgeschwindigkeit mit zunehmender Amplitude anzusteigen scheint (Tabelle 4-5).

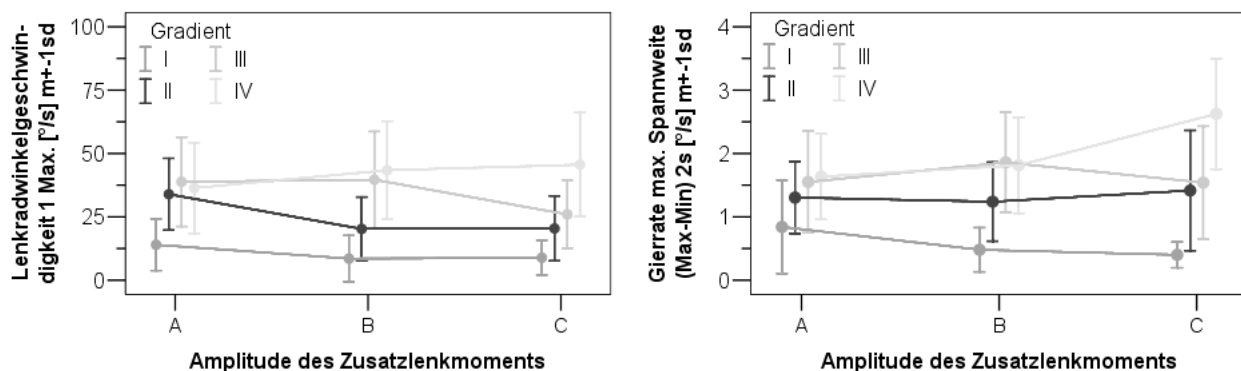


Abbildung 4-28: Erstes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (links) und maximale Spannweite der Gierrate (rechts) pro Gradient und Amplitude des Zusatzmoments.

	Erstes Maximum des Lenkradwinkels	Zeit des 1. Lenkradwinkelmaximums	Max. Lenkradwinkelgeschwindigkeit	Maximale Spannweite der Gierrate
$p_{\text{IA-IB}}$	0.568	0.642	0.022	0.027
$p_{\text{IA-IC}}$	0.092	0.732	0.051	0.015
$p_{\text{IB-IC}}$	0.169	0.934	0.842	0.352
$p_{\text{IIA-IIB}}$	0.232	0.006	0.001	0.632
$p_{\text{IIA-IIC}}$	0.031	0.001	0.001	0.527
$p_{\text{IIB-IIC}}$	0.750	0.079	0.961	0.238
$p_{\text{IIIA-IIIB}}$	0.034	0.001	0.855	0.017
$p_{\text{IIIA-IIC}}$	0.087	0.001	0.001	0.934
$p_{\text{IIIB-IIC}}$	0.758	0.172	0.013	0.076
$p_{\text{IVA-IVB}}$	0.001	0.001	0.162	0.347
$p_{\text{IVA-IVC}}$	0.001	0.001	0.073	0.001
$p_{\text{IVB-IVC}}$	0.145	0.023	0.573	0.001

Tabelle 4-5: Post-hoc T-Tests zu Interaktionseffekt von Amplitude und Gradient

Die fahrdynamische Reaktion, die durch den Einfluss des Zusatzmoments auf die Lenkung und Reaktion des Fahrers hierauf hervorgerufen wird, ist hier über die Gierreaktion des Fahrzeugs beschrieben. Abbildung 4-28 (rechts) zeigt die maximale Spannweite der Gierrate als Differenz zwischen maximaler und minimaler Gierrate innerhalb von zwei Sekunden nach Aufschaltung des Zusatzmoments. Der Großteil der Varianz kann eindeutig durch den Gradienten aufgeklärt werden: Mit zunehmendem Gradienten steigt die Spannweite der Gierrate ($p_{\text{grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.779$; LSD: $p_{\text{I-II}} < 0.001$; $p_{\text{II-III}} = 0.010$; $p_{\text{III-IV}} < 0.001$). Dies kann durch den gleichförmigen Einfluss des Gradienten auf Lenkung und Fahrerreaktion erklärt werden. Daneben zeigt sich eine signifikante Wechselwirkung von Gradient und Amplitude ($p_{\text{amp*grad}} < 0.001$; $\eta^2 = 0.334$). Die post-hoc Analyse belegt eine Abnahme der Gierreaktion für Gradient I. Für Gradient IV nimmt die Fahrzeugreaktion mit steigender Amplitude zu (Tabelle 4-5).

Damit zeigen die objektiven Kennwerte, dass der Fahrer schneller auf Zusatzmomente höherer Dynamik reagiert. Gleichzeitig führt ein steilerer Gradient zu stärkeren Fahrerreaktionen während der Kompensation des Zusatzmoments. Diese schnellere und stärkere Kompensation des Fahrers kann jedoch stärkere Fahrzeugreaktionen nicht verhindern. Obwohl durch eine Verringerung der maximalen Amplitude des Zusatzmomentes der Effekt eines steileren Gradienten ausgleichen kann, gilt dieser Wirkzusammenhang nicht generell. Bei kleinen Gradienten besitzt die Amplitude keinen Einfluss mehr auf den Fahrzeugzustand und Parameter des Lenkens. Dagegen steigen die subjektiven Bewertungen der Störungsauswirkungen durch den Fahrer auch bei geringen Gradienten mit zunehmender Amplitude. Ein Grund hierfür könnte die Dauer der Störungsepisode sein: Größere Amplituden bedeuten eine längere Störung, für die der Fahrer mehr Zeit zur Kompensation benötigt. Die hier extrahierten Parameter erlauben jedoch keine Prüfung dieser Vermutung.

4.4.3 Validierung der Ergebnisse im Fahrzeug

Zur Validierung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse zum Einfluss des Gradienten wurde eine weitere Studie im Realfahrzeug mit 30 Probanden durchgeführt (Studie 4). Neben der Überprüfung des generellen Zusammenhangs sollten die absoluten Größen der Auswirkungen einer Gradientenänderung im Fahrzeug gewonnen werden. Damit lassen sich die weiteren Ergebnisse aus dem Simulatorexperiment skalieren und mit Einschränkungen auf die Realsituation übertragen. Als Fahrsituation wurde aus Gründen der Übertragbarkeit eine durch Pylonen begrenzte Engstelle mit 2.5m Breite gewählt, in der Zusatzmomente der Amplitude B mit den Gradienten II und III appliziert wurden. Eine genaue Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Stichprobe wird in Abschnitt 3.3.4 geleistet. Dargestellt werden die Auswirkungen der aufgeschalteten Zusatzmomente auf das Fahrzeug und die Reaktionen und Bewertung des Fahrers dieser hervorgerufenen Fahrzeugreaktionen. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt, in die die Gradienten II und III aufgenommen wurden. Die Baseline-Messung 0 wurde hier nicht berücksichtigt, weil die Auswirkungen der Steigerung des Gradienten im Fokus des Interesses stehen.

Abbildung 4-29 zeigt links das durch das Zusatzmoment hervorgerufene erste Maximum des Lenkradwinkels. Während ein Lenkmoment mit dem Gradienten II zu einer Auslenkung von $m_{II}=2.35^\circ$ führt, erhöht sich diese Auslenkung signifikant auf $m_{III}=3.54^\circ$ bei Aufschaltung eines Moments mit Gradient III ($p_{grad}=0.001$; $\eta^2=0.308$). Insgesamt zeigt sich die Auslenkung als geringer als im Simulatorversuch (Abschnitt 4.4.2). Auch die Heftigkeit der Reaktion des Fahrers auf das Zusatzmoment, die in Abbildung 4-29 rechts dargestellt ist, erweist sich als abhängig von der Anstiegssteilheit des Zusatzmoments ($p_{grad}=0.010$; $\eta^2=0.214$). Neben der erhöhten mittleren maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeit ist bei dem Gradienten III zusätzlich eine Erhöhung der Varianz gegenüber Gradient II zu beobachten. Im Vergleich zum Simulatorexperiment sind mittleren maximalen Lenkradwinkelgeschwindigkeiten erhöht, aber insgesamt deutlich unter $100^\circ/s$ und damit als unkritisch einzustufen.

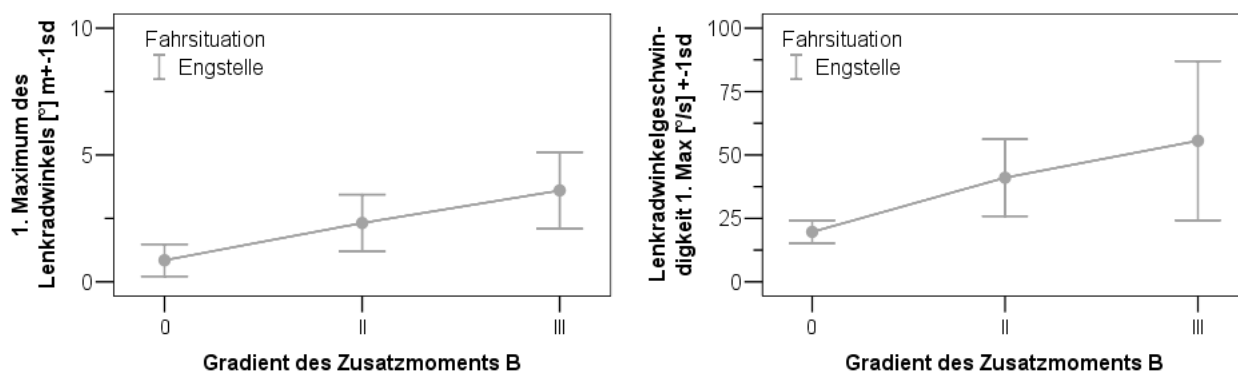


Abbildung 4-29: Erstes Maximum des Lenkradwinkels (links) und darauffolgendes Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit (rechts) pro Gradient des Zusatzmoments.

Entsprechend der erhöhten Auswirkungen auf das Lenksystem und der darauf folgenden Fahrerreaktionen erweist sich auch die maximale Spannweite der Gierrate nach Zusatzmomentenaufschaltung als signifikant vom Gradienten abhängig ($p_{grad}=0.001$; $\eta^2=0.333$): Dieser die resultierenden Fahrzeugreaktionen beschreibende Kennwert steigt mit steilerem Gradienten von $m_{II}=2.00^\circ/s$ auf $m_{III}=2.36^\circ/s$ an (Abbildung 4-30).

Die Bewertung der Störungsepisode durch den Fahrer erweist sich erwartungsgemäß auch als signifikant vom Gradienten abhängig ($p_{grad}=0.024$; $\eta^2=0.170$). Ein Zusatzmoment mit steilerem Anstieg wird als geringfügig störender bewertet und steigt von $m_{II}=3.08$ auf $m_{III}=3.39$. Insgesamt liegen die Bewertungen bei beiden Gradienten im Mittel noch im Bereich der Bemerkbarkeit und damit leicht unter den Werten des Simulatorexperiments.

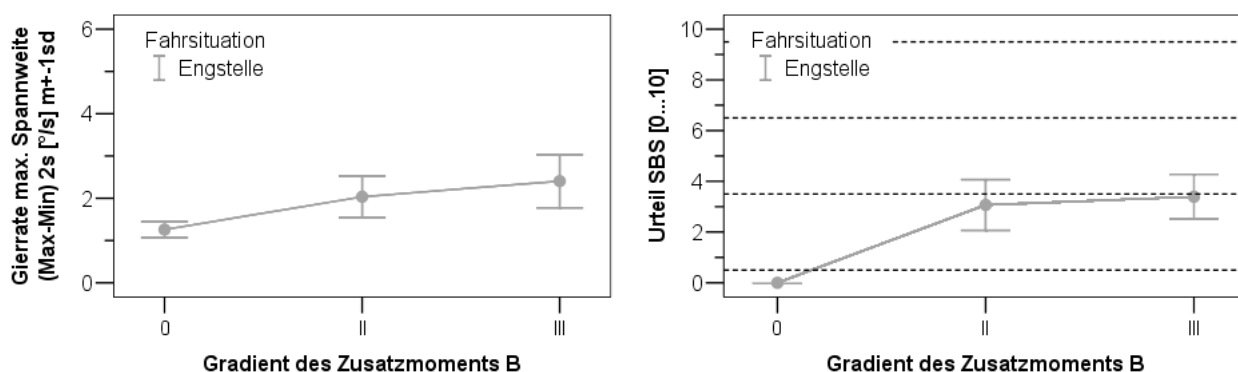


Abbildung 4-30: Maximale Spannweite der Gierrate (links) und subjektive Bewertungen der Störungsauswirkungen (rechts) durch die Zusatzmomente pro Gradient.

Zusammenfassend kann damit festgehalten werden, dass die in der Simulatoruntersuchung entdeckten Zusammenhänge zwischen Gradient eines Zusatzmoments und seinen Auswirkungen für die mittleren Gradienten II und III bestätigt werden konnten. Die insgesamt geringen Verschiebungen der absoluten Werte lassen sich durch eine Vielzahl von Faktoren erklären. So ist einerseits die Informationsrückmeldung an den Fahrer im Fahrsimulator eingeschränkt: Zwar wird ihm über das Lenkrad die haptische Rückmeldung über die Störungsauswirkungen geliefert und es ist ihm möglich, über den visuellen Kanal hervorgerufene Abweichungen zu erleben, eine kinästhetische Rückmeldung der Fahrzeugbewegung fehlt jedoch. Es ist davon auszugehen, dass der Unterschied in den Absolutwerten zumindest in Teilen hierauf zurückzuführen ist. Weiterhin wurden in beiden Untersuchungen unterschiedliche Fahrzeugmodelle eingesetzt (Ford Taurus vs. VW Touran). Insbesondere hinsichtlich der Lenkcharakteristik unterscheiden sich beide Fahrzeuge. Auch dies ist ein möglicher Grund für veränderte absolute Werte. Insgesamt zeigt sich über diese Validierungsstudie, dass der Gradient bei Applikation von zusätzlichen Lenkmomenten wesentlich für die Wahrnehmung und Reaktion des Fahrers und die resultierenden Fahrzeugreaktionen ist und neben der Amplitude den wichtigsten Einflussfaktor auf Seiten der Signalcharakteristik darstellt.

4.4.4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Amplitude bei sprungförmig aufgeschalteten Zusatzlenkmomenten bestimmend für die Bewertung der Störungsauswirkungen und die fahrdynamischen Reaktionen durch den Eingriff sind. Bemerkenswert sind die beobachteten schnellen Reaktionszeiten um 200ms, die die allgemein postulierte Schrecksekunde des Fahrers als nicht allgemeingültig darstellen und das Potential haptischer Signale zur Informationsvermittlung an den Fahrer unterstreichen. Die Reaktionen erscheinen dennoch der Situation angemessen und vom Fahrer vollständig kontrolliert. Durch die Begrenzung der Anstiegssteilheit des Zusatzlenkmoments kann der Einfluss der Amplitude zumindest stark verringert werden. So zeigen sich bei den geringsten dargestellten Gradienten keinerlei Veränderung der betrachteten fahrdynamischen Kennwerte bei Variation der Amplitude im hier untersuchten Bereich. Dennoch erscheint die Bewertung weiterhin von der Stärke des Signals beeinflusst. Es ist denkbar, dass das Aufbringen von höhern Haltekräften über Zeit für den Fahrer zwar ohne weiteres möglich ist, aber dennoch von ihm als störender empfunden wird. Dieser Gedanke kann mit den vorliegenden Daten jedoch nicht weiter geprüft werden.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Signalparameter stützen damit insgesamt die Hypothese, dass ein genereller Zielkonflikt zwischen Amplitude und Gradient existiert. Für die Gestaltung haptischer Signale in der Lenkung für Spurführungssysteme kann damit geschlossen werden, dass die Kontrollierbarkeit durch eine ausreichende Verringerung von Gradient oder Amplitude gewährleistet werden kann. Allerdings beschränkt eine geringe maximale Amplitude viele erweiterte Systemfunktionalitäten eines Spurführungssystems. Daher ist eine Verringerung der Amplitude nicht immer wünschenswert. Als interessant erweist sich vor diesem Hintergrund das Ergebnis, dass der Einfluss der Amplitude auf die für die Bewertung der Kontrollierbarkeit wesentlichen fahrdynamischen Maße bei ausreichend geringer Anstiegssteilheit abnimmt. Zumindest für die in dieser Studie dargestellten Amplituden ist der Fahrer bei dem geringsten Gradienten stets in der Lage, die Zusatzmomente und ihre Auswirkungen zu kompensieren. Diese Ergebnisse liefern weiter Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit menschlicher Wahr-

nehmung und motorischer Reaktion: Die Kompensation einer Kraft ist für den Fahrer nicht problematisch. Vielmehr erweist sich ein schneller Wechsel der Kraft für den Fahrer als schwieriger zu kontrollieren. Tabelle 4-4 fasst die zentralen Aussagen dieses Abschnitts in der Übersicht zusammen.

1	Sowohl Amplitude als auch Anstiegssteilheit zeigen in den durchgeführten Studien sich als wesentliche Faktoren bei Wahrnehmung und Reaktion auf zusätzliche Lenkmomente.
2	Es konnte ein Trade-off von Amplitude und Anstiegssteilheit festgestellt werden: Signale mit hohen Amplituden scheinen nur bei flachen Anstiegen für den Fahrer kontrollierbar. Dagegen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass bei steilen, schnellen Ansteigen nur geringe Amplituden zumutbar sind.
3	Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Steilheit die Amplitude moderiert und für den Fahrer der wesentlichere Faktor ist. So konnten bei geringen Anstiegssteilheiten selbst bei den größten untersuchten Amplituden keine stärkeren Fahrzeugreaktionen gemessen werden.

Tabelle 4-6: Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Variation der Signalparameter.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zu Auswirkungen von Lenkmomenten auf das Fahrer-Fahrzeug-System

Über die durchgeführten empirischen Untersuchung im Fahrsimulator und im Realfahrzeug zur Untersuchung der Auswirkungen von aufgeschalteten Lenkmomenten auf das Fahrer-Fahrzeug-System lassen sich eine Vielzahl von Schlussfolgerungen ziehen: So können aus den Ergebnissen einerseits Empfehlungen für einen weiteren methodischen Zugang zur Untersuchung solcher Signale im Fahrzeug abgeleitet werden. Zum anderen lässt sich über die Vielzahl der betrachteten Einflussfaktoren ein Gesamtbild der menschlichen Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten und der Reaktion auf diese skizzieren. Aus diesem Gesamtbild lassen sich Empfehlungen für das Design von gerichteten Eingriffen in die Lenkung zur Unterstützung des Fahrers ableiten.

Hinsichtlich des Vorgehens zur Untersuchung der Auswirkungen von Lenkungseingriffen mit Normalfahrern, wie vom RESPONSE Code of Practice [PRE05] als ein Baustein zur Freigabe entsprechender Assistenzsysteme gefordert, konnten geeignete Fahrmanöver identifiziert werden. Ausgehend von einer Analyse unterschiedlicher möglicher Fahrsituationen wurden diejenigen Manöver abgeleitet, die einerseits den Anspruch haben, den Leistungsbereich des Normalfahrers im Straßenverkehr abzudecken und straßenbauliche Vorschriften einbeziehen. Aus dem Vergleich der Auswirkungen der Zusatzmomente zwischen dynamischen Fahrmanövern und stationären mit und ohne Querdynamik zeigt sich die 2.5m breite Engstelle als sensitivstes Fahrmanöver, da hier die kritischsten Bewertungen der Versuchspersonen erfolgen. Dieses Manöver stellt einerseits durch die stark limitierte Breite hohe Anforderungen an den Fahrer und sein Querregelverhalten. Andererseits liefert die Pylonengasse dem Fahrer eine klare Referenz für ein erfolgreiches und sicheres Absolvieren des Manövers bei gleichzeitigem Aufschalten eines Lenkmoments. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass eine Bewertung der Auswirkungen der Zusatzmomente auf Fahrer und Fahrzeug allein durch die Betrachtung des Manövers Engstelle geleistet werden kann.

Daneben wurden unterschiedliche Fahrergruppen betrachtet. Im Sinne potentiell schwächerer Fahrergruppen wurden aufgrund von Unfallstatistiken jüngere, unerfahrene Fahrer ausgewählt. Da mit steigendem Alter neben einem leichten Anstieg des Unfallrisikos auch perzeptive und motorische Einschränkungen zunehmen, wurden ältere Fahrer (55 bis 78 Jahre) als

weitere Subgruppe in die Untersuchungen miteinbezogen. Die Ergebnisse zeigen diese beiden Fahrergruppen als genauso leistungsfähig in Bezug auf die Kompensation von Zusatzmomenten wie Fahrer mittleren Alters mit normaler Fahrerfahrung. Aufgrund der geringen Stichprobengrößen wurden diese Ergebnisse in einer weiteren Studie repliziert. Damit erscheinen diese Gruppen in Bezug auf Zusatzlenkmomente nicht als besonders gefährdet und müssen in weiteren Untersuchungen nicht im Speziellen berücksichtigt werden. Kritisch anzumerken bleibt an der Stelle jedoch das Dilemma bei der Rekrutierung älterer Fahrer: Es ist in Regel davon auszugehen, dass sich insbesondere leistungsstarke an den freiwilligen Untersuchungen beteiligen. Stark leistungsgeminderte Personen nehmen kaum freiwillig an Probandenstudien teil. Daher muss davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse die Realität eher unterschätzen. Es bleibt zu diskutieren, wie dieses grundsätzliche Dilemma für weitere Untersuchungen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion gelöst werden kann.

Ausgehend von den Erkenntnissen zu einem geeigneten methodischen Ansatz zur Untersuchung von Lenkmomentenaufschaltungen wurde eine Vielzahl von situativen Einflussfaktoren untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit weder die Bewertung der Zusatzmomente, noch die fahrdynamischen Auswirkungen auf den Normalfahrer in dem untersuchten Bereich von 70 bis 100km/h beeinflusst. Dabei treten aufgrund der Lenkungsabstimmung und der Gierdämpfung gegenwärtiger Fahrzeug in diesem Geschwindigkeitsbereich die stärksten Fahrzeugreaktionen auf. Bei geringeren und höheren Geschwindigkeiten bis 200km/h sind die Auswirkungen der Zusatzmomente auf das Fahrzeug schwächer.

Da die hier diskutierte Nutzung von Zusatzlenkmomenten im Bereich der Spurhalte- oder Spurführungsassistenten liegt, wurde die Aufschaltung von Zusatzmomenten auch bei gleichzeitig aktivierter Spurführungsassistenten mit Normalfahrern getestet. Die Wahrnehmungszusammenhänge verschieben sich dadurch aber nur geringfügig: Bei sprungförmigen Momentenanforderungen, die sich deutlich von den kontinuierlichen Regeleingriffen eines Spurführungsassistenten unterscheiden, sind keinerlei Unterschiede zur Aufschaltung ohne Querführungsunterstützung zu beobachten. Langsam einrampende Zusatzmomente mit begrenzter Anstiegsteilheit werden leicht verzögert wahrgenommen und gehen deshalb mit stärkeren Fahrzeugreaktionen einher. Auch die subjektiven Bewertungen sind leicht erhöht. Dabei blieben die Bewertungen stets innerhalb des zu tolerierenden Bereiches.

Eine Variation der Fahrzeugeigenschaften, um den Einfluss des Übertragungsverhaltens zu bestimmen, fand in der Form statt, dass Störungen bei zwei Fahrzeugen gleichen Modells mit unterschiedlicher Abstimmung des Lenksystems untersucht wurden. Hier zeigt sich, dass eine Erhöhung der Steifigkeit der Lenkung zur Verringerung der subjektiven Störungsbewertung und der objektiven fahrdynamischen Parameter führt. Dies geht mit positiveren Bewertungen durch die Fahrer einher. Es ist davon auszugehen, dass ein ähnlicher Effekt bei der Variation des Fahrzeugs zu beobachten ist, sofern durch das Übertragungsverhalten bei gleichen Zusatzmomenten schwächere Fahrzeugreaktionen auftreten. Daher wurde dieser Einflussfaktor nicht weiter betrachtet. Von Interesse ist eher, ob in diesen unterschiedlichen Fahrzeugen gleichstarke Fahrzeugreaktionen als Folge unterschiedlich starker Zusatzmomente zu gleichen Bewertungen führen. Diese Frage nach der Führungsgröße des Fahrers bildet den Kern von Kapitel 5.

Als entscheidend zeigen sich die Signalparameter eines Zusatzmomentes. Nach den Erkenntnissen von [Bus03] und [GSN+05] wurden die Amplitude und die Anstiegssteilheit überprüft. Wenngleich im Einklang mit den Befunden zum menschlichen Wahrnehmungsapparat, dessen Mechanosensorik besonders auf Geschwindigkeit einer Druckveränderung reagiert, erweist sich die Wichtigkeit der Anstiegssteilheit auf die Wahrnehmung des Fahrers als erstaunlich groß. So moderiert der Gradient den Einfluss der Amplitude auf die Fahrzeugreaktion nicht nur, sondern lässt deren Einfluss bei geringen Gradienten vollkommen verschwinden. Der Fahrer scheint unterhalb einer bestimmten Anstiegssteilheit in der Lage, eine lineare Kraftänderung unabhängig von der Amplitude zu kompensieren. Allerdings schwindet der Einfluss der Amplitude auf die subjektive Bewertung durch den Fahrer auch bei diesen geringen Anstiegssteilheiten nicht vollständig. Dies wird als Hinweis darauf gedeutet, dass die Kompensation größerer Amplituden zwar möglich ist, bei geringeren Gradienten, aber gleichzeitig auch als stärker beanspruchend und störend erlebt wird.

Im Hinblick auf den Einsatz von Lenkmomenten für Spurführungssysteme ist dieses Ergebnis wesentlich: So ist es über die Begrenzung der Anstiegssteilheit eines Zusatzmoments möglich, den Zielkonflikt in den Anforderungen für Assistenzsystem und Fahrer, starke Eingriffsmöglichkeit für die Funktion einerseits und für den Fahrer kontrollierbare Eingriffe andererseits zu lösen.

1	Mit dem dargestellten Verfahren wurde ein methodischer Ansatz zur Untersuchung der Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomenten auf das Fahrer-Fahrzeug-System unter Berücksichtigung des RESPONSE Code of Practice beschrieben und durchgeführt.
1.1	Die Engstelle wurde als geeignetes Fahrmanöver für die Bewertung von zusätzlichen Lenkmomenten durch Normalfahrer identifiziert. Dieses Fahrmanöver hat sich gegenüber Geradeaus-, Kurvenfahrt und einem Spurwechselmanöver als am sensitivsten gezeigt.
1.2	Der durchgeführte Vergleich von Normalfahrern mit potentiell schwächeren Fahrergruppen wurde über die Testung von jüngeren und älteren Fahrern geleistet. Diese beiden Gruppen zeigten in den Untersuchungen keine Abweichungen von den Normalfahrern. Kritisch anzumerken ist neben der hohen Fahrleistung der Teilnehmer die Tatsache, dass schwächere Fahrer schwierig für Fahrversuche zu rekrutieren sind.
2	Durch die durchgeführten Untersuchungen konnten die Wirkzusammenhänge der Fahrerwahrnehmung und der Reaktionen des Fahrer-Fahrzeug-Systems genauer beschrieben werden.
2.1	Die Geschwindigkeit erwies sich in den untersuchten Bereichen von 70 und 100km/h nicht als wesentlicher Faktor bei der Zuschaltung zusätzlicher Lenkmomente.
2.2	Bei gleichzeitiger Aktivierung einer kontinuierlichen Spurführungsassistenz reagieren die Fahrer in den vorliegenden Untersuchungen später, falls rampenartige Zusatzmomente aufgeschaltet werden. Auf sprungförmige Momente wird gleichartig reagiert.
2.3	Die Variation von Fahrzeugparametern über die Veränderung der Lenkcharakteristik zeigt sich als bedeutsamer Faktor. Dies unterstreicht die Einschränkungen bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Fahrzeuge.
2.4	Hinsichtlich der Signalparameter erweist sich die Anstiegssteilheit als wesentlicher Faktor. Die Ergebnisse zeigen, dass es durch Begrenzung der Anstiegssteilheit möglich ist, Zusatzlenkmomente für den Fahrer im Bereich der Kontrollierbarkeit zu halten. Bei entsprechender Verringerung der Anstiegssteilheit können Effekte der Amplitude der Signale nahezu eliminiert werden.
2.5	Neben der Anstiegssteilheit ergibt sich die Amplitude als bedeutsam hinsichtlich der Wahrnehmung und Reaktion auf zusätzliche Lenkmomente. Sofern nicht durch eine Limitierung der Anstiegssteilheit die Kontrollierbarkeit gewährleistet wird, zeigen die Untersuchungen, dass über die Begrenzung der Amplitude ein vergleichbarer Effekt hergestellt werden kann.

Tabelle 4-7: Kurzübersicht der zentralen Ergebnisse von Kapitel 4.

5 Die Führungsgröße des Fahrers

Die fahrdynamischen Auswirkungen der applizierten Zusatzmomente sind stark von den Eigenschaften des untersuchten Fahrzeugs abhängig. Auch die Reaktionen auf Eingaben des Fahrers unterscheiden sich zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen. Damit erlebt der Fahrer bei gleichen angeforderten Zusatzmomenten in unterschiedlichen Fahrzeugen zum Teil Unterschiedliches. Obwohl davon auszugehen ist, dass die hier identifizierten Einflussfaktoren auch bei anderen Fahrzeugen in gleicher Weise wirken, lassen sich absolute Werte der Parameter nicht ohne weiteres auf andere Fahrzeuge übertragen.

In diesem Kapitel soll daher der Versuch unternommen werden, die fundamentalen Zusammenhänge der Wahrnehmung und Reaktion auf zusätzliche Lenkmomente aufzuklären. Bislang ist offen, ob der Fahrer tatsächlich auf die Kraftrückmeldung im Lenkrad reagiert oder aber die daraus resultierende Lenkrad- oder Fahrzeugbewegungen bewertet. Damit stellt sich die Frage nach den Führungsgrößen des Fahrers beim Ausregeln der durch die Zusatzlenkmomente ins Fahrer-Fahrzeug-System eingebrachten Störung. Wenngleich davon ausgegangen werden kann, dass der Fahrer mehrere Eingangsgrößen zur Erfüllung seiner Querregelaufgabe heranzieht, ist die Identifikation der Gesamtzusammenhänge aufgrund der hohen Interkorrelation der Zustandsgrößen im Fahrzeug kaum möglich. Daher soll in einem ersten Schritt zunächst die wesentlichste der Führungsgrößen identifiziert werden. Über den Zusammenhang zwischen Lenkmomentaufschaltung und Führungsgröße ließe sich mit Hilfe des Fahrzeugmodells ableiten, welche Lenkmomentanregungen bei einem beliebigen Fahrzeuge zu Anregungen führen, die vom Fahrer als nicht „gefährlich“ [NK03] und damit kontrollierbar bewertet werden.

5.1 Ableitung fahrzeugunabhängiger Parameter

Der schematische Ablauf der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Anforderung von Zusatzmomenten ist in Abbildung 5-1 dargestellt: Die Störungen werden vom Fahrzeug in Bewegungen umgesetzt. Der Fahrer nimmt diese Bewegungen wahr und reagiert im Sinne einer negativen Rückkopplung mit Fahrereingaben auf die wahrgenommene Änderung der Bewegungsparameter, um die Störung auszugleichen.

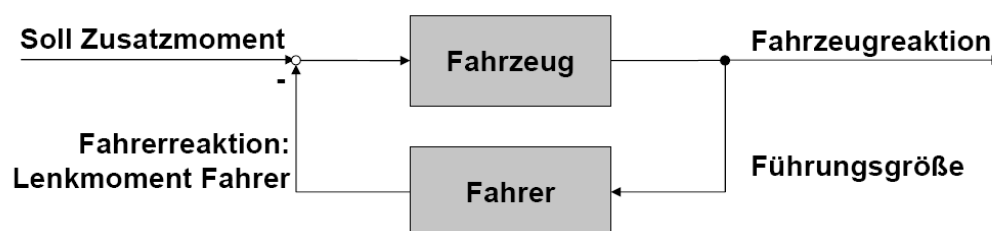


Abbildung 5-1: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis bei Vorgabe von Zusatzmomenten.

Um den Einfluss des Übertragungsverhaltens des Fahrzeugs in Teilen zu eliminieren, ist es möglich, die Fahrerwahrnehmung und -reaktion direkt auf die Bewegungsgrößen des Fahrzeugs zu beziehen. Zwar berücksichtigt dieser Ansatz nicht das Übertragungsverhalten des Fahrzeugs auf Fahrereingaben, jedoch sind die Anteile der Störungsepisode, die aus dem

angeforderten Zusatzlenkmoment resultieren, nicht mehr durch das Fahrzeug moderiert. Die so gewonnenen Grenzwerte zumutbarer Fahrzeugbewegung sind als Schätzungen fahrzeugunabhängiger Grenzwerte zu verstehen. Bei Kenntnis der dynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs sind dann aus diesen Grenzwerten in den fahrdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs maximal zuzumutende Zusatzmomente bestimmbar.

Konkret bedeutet dies, dass die Bewertungen der Fahrer nicht direkt zu den angeforderten Lenkmomenten in Bezug gesetzt werden, sondern direkt zu den beobachteten fahrdynamischen Auswirkungen der Zusatzmomente in Lenkung und Fahrzeugreaktion. Über lineare Regression kann der Zusammenhang zwischen einzelnen Fahrzeugparametern und der subjektiven Bewertung hergestellt werden. Dies entspricht Vorgehensweisen zur Vorhersage subjektiver Bewertungen aus objektiven Fahrparametern [NEU01]. Die standardisierten Beta-Gewichte der Regressionsanalysen lassen die Wichtigkeit der jeweils betrachteten Parameter für die subjektiven Störungsbewertungen beurteilen. Zur Ermittlung fahrzeugunabhängiger Grenzwerte werden die Fahrzeugreaktionen zunächst kategorisiert und dann die mittleren Bewertungen pro Kategorie der Fahrzeugreaktion berechnet (Abbildung 5-2).

Daraus lässt sich ableiten, ab wann Fahrzeugreaktionen vom Fahrer bemerkt werden und wie stark diese maximal sein dürfen, um von ihm als kontrollierbar bewertet zu werden. Eine Übertragung dieser Grenzwerte auf andere Fahrzeuge ist nicht generell möglich. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass bei Fahrzeugen mit einer geringeren und langsameren Reaktion vom Fahrer auch als kontrollierbar bewertet werden. Hierzu werden diese Zusatzmomente in einem Setting ohne Fahrer aufgeschaltet, um die entsprechenden Fahrzeugreaktionen vom Einfluss des Fahrers befreit zu ermitteln. Bei Lenkmomenten, die bei anderen Fahrzeugen ohne Fahrereinfluss (z.B. keine Hände am Lenkrad) maximal diese Fahrzeugreaktionen hervorrufen, kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer in der Lage ist, diese genauso zu kompensieren. Auf diesem Weg lassen sich Ergebnisse aus einem Fahrzeug auf Fahrzeuge mit gutmütigerem Übertragungsverhalten anwenden.

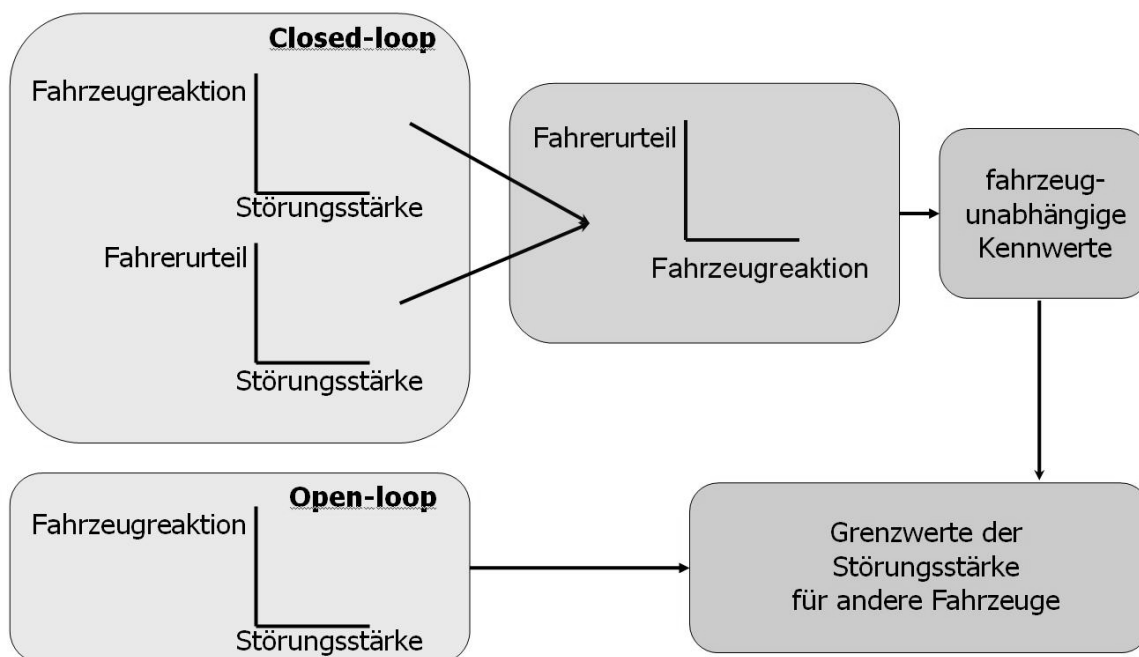


Abbildung 5-2: Vorgehen zur Bestimmung der Führungsparameter für den Fahrer bei Anregung durch Zusatzlenkmomente und zur Ableitung fahrzeugunabhängiger Grenzwerte.

Voraussetzung aber bleibt die Identifikation von fahrphysikalischen Parametern, die hoch mit dem subjektiven Urteil des Fahrers korrelieren. Zu prüfen ist ein solcher Zusammenhang auch unter veränderten Bedingungen. Dies ist mit Hilfe der in Kapitel 4 identifizierten Einflussfaktoren möglich. In einem ersten Schritt wird im nachfolgenden Abschnitt zunächst der Einfluss des Fahrzeugmodells auf den Zusammenhang von fahrdynamischer Reaktion und Bewertung durch den Fahrer betrachtet.

5.2 Einfluss der Fahrzeugeigenschaften

Zur Identifizierung der Führungsparameter des Menschen bei der Bewertung von Zusatzlenkmomenten werden zunächst die beiden unterschiedlichen Fahrzeugabstimmungen des Versuchs miteinander verglichen. In Fahrzeug B ist die Lenkung insgesamt straffer als in Fahrzeug A. Dies erklärt auch die bisherigen Ergebnisse: So führen die Anforderungen gleicher Zusatzmomente an die jeweilige Lenkung bei Fahrzeugabstimmung B zu geringeren fahrphysikalischen Reaktionen und Beurteilungen (Abschnitt 4.2). Betrachtet werden hier die Auswirkungen von sprungförmigen Zusatzmomenten mit maximaler Anstiegssteilheit. Diese Signale liefern eine deutliche Fahrzeugreaktion und werden im Sinne einer Sprungantwort zur Systemidentifikation [Unb05] eingesetzt. Die hier dargestellten Messungen wurden in Studie 1 gewonnen (Abschnitt 3.3.1).

Im ersten Schritt werden die Korrelationen der fahrdynamischen Parameter mit dem Urteil des Fahrers berechnet ohne zwischen den Fahrzeugabstimmungen zu trennen (Tabelle 5-1). Die geringsten Korrelationen mit dem Subjektivurteil weisen die Lenkwinkelgeschwindigkeit und der Zeitpunkt des ersten Lenkwinkelmaximums auf. Querbefleunigungs- und Gierreaktion, sowie das erste Maximum des Lenkwinkels und des Lenkmoments hängen stärker mit dem Fahrerurteil zusammen. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich deshalb auf diese Parameter.

	Urteil SBS	Gierrate	ay	LW	dLW	LM	tLW
Urteil SBS	1.000	0.675	0.693	0.695	0.439	0.623	0.174
Gierrate max. Spannweite	0.675	1.000	0.976	0.903	0.718	0.635	-0.062
Querbefleunigung maximale Spannweite (ay)	0.693	0.976	1.000	0.892	0.714	0.620	-0.015
1. Maximum Lenkradwinkel (LW)	0.695	0.903	0.892	1.000	0.656	0.760	0.020
Maximale. Lenkradwinkelgeschwindigkeit (dLW)	0.439	0.718	0.714	0.656	1.000	0.342	-0.014
Maximum Lenkmoment (LM)	0.623	0.635	0.620	0.760	0.342	1.000	0.080
Zeitpunkt des ersten Lenkwinkelmaximums (tLW)	0.174	-0.062	-0.015	0.020	-0.014	0.080	1.000

Tabelle 5-1: Korrelationen der betrachteten Maße

Die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen objektivem und subjektivem Parameter erfolgt über die Approximation einer linearen Funktion (Formel 5.1) und einer Sigma-Funktion (Formel 5.2). Während die Sigma-Funktion besser allgemeine Wahrnehmungszusammenhänge

ge des Menschen beschreibt, erlaubt die lineare Funktion einen Vergleich zwischen Varianten. Die Variablen der jeweiligen Funktionen sind bei den jeweiligen Grafiken angegeben. Die Güte der Passung wird über den Determinationskoeffizienten R^2 , der den Anteil der aufklärten Varianz angibt, und p als Kenngröße der statistischen Absicherung dargestellt.

$$\text{Urteil} = a \cdot x + b \quad (5.1)$$

$$\text{Urteil} = \frac{a}{1 + \left(\frac{b}{x^c}\right)} \quad (5.2)$$

Für die Gier- und Querschleunigungsreaktion zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der Zusammenhänge bei den verschiedenen Fahrzeugabstimmungen (Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4). Dabei liegen die linearen Approximationen für beide Varianten praktisch übereinander. Die approximierten Sigma-Funktionen unterscheiden sich im Bereich größerer Fahrzeugreaktionen. Der hohe Zusammenhang dieser beiden Parameter lässt vermuten, dass es sich größtenteils um redundante Informationen handelt (Tabelle 5-1). Die Abbildung durch die Approximationen ist für beide Parameter mit $R^2 > 0.87$ (linear) bzw. $R^2 > 0.92$ (sigmoid) sehr gut. Aufgrund des höheren Freiheitsgrades liefert die Sigma-Funktion dabei erwartungsgemäß eine etwas bessere Annäherung. Bei der Bewertung der Auswirkungen vertikaler Anregungen bei gleichzeitiger Querschleunigung zeigt die Gierreaktion des Fahrzeugs als wesentlichsten Faktor [SSN+06]. Kennwerte der Querschleunigung wurden dort nicht betrachtet. Die Probanden bewerten die hier aufgeschalteten Anregungen bei gleichzeitigen Gierreaktionen im Bereich bis 5°/s im Mittel geringer als 6.5. Dieser Zusammenhang kann aber nicht als kausal angenommen werden. Hinsichtlich der Querschleunigungsreaktion, die in diesem Versuch bei Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente als Resultat des Übertragungsverhaltens des Systems Fahrer-Fahrzeug auftraten, bewertet der Fahrer bis ca. 2m/s² im Mittel unterhalb von 6.5 (Abbildung 5-4).

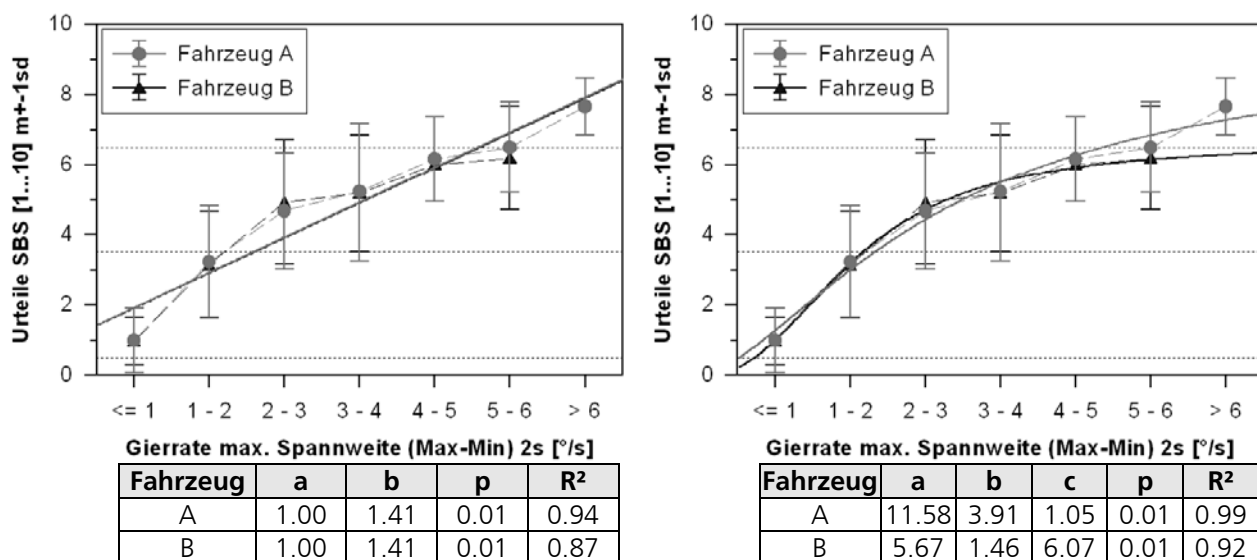


Abbildung 5-3: Bewertung der aufgetretenen Gierrate der Fahrzeuge A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).

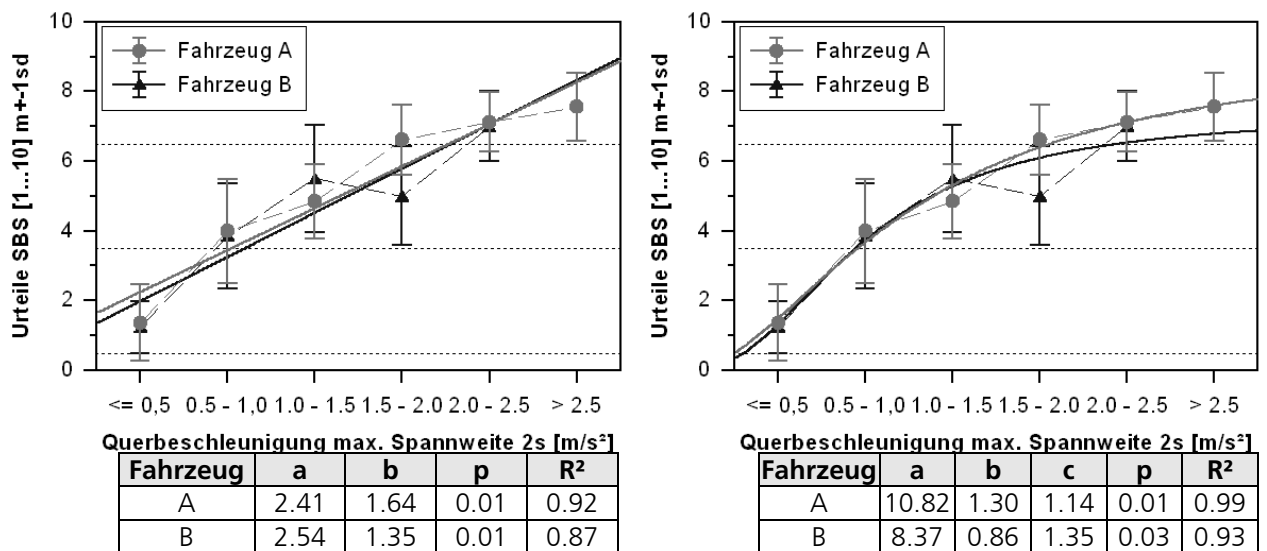


Abbildung 5-4: Bewertung der aufgetretenen Querbeschleunigung der Fahrzeuge A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).

Ähnliches gilt, wenngleich mit etwas geringer Übereinstimmung, zwischen den Fahrzeugvarianten, für das erste Maximum des Lenkradwinkels (Abbildung 5-5). Nicht zu beantworten ist an dieser Stelle inwiefern sich die Informationen aus den unterschiedlichen Parametern stützen. Zwar ist davon auszugehen, dass der Mensch gleichzeitig mehrere Eingangsgrößen berücksichtigt, aufgrund der hohen Interkorrelationen der Fahrparameter ist eine multiple Korrelation aber nicht zulässig.

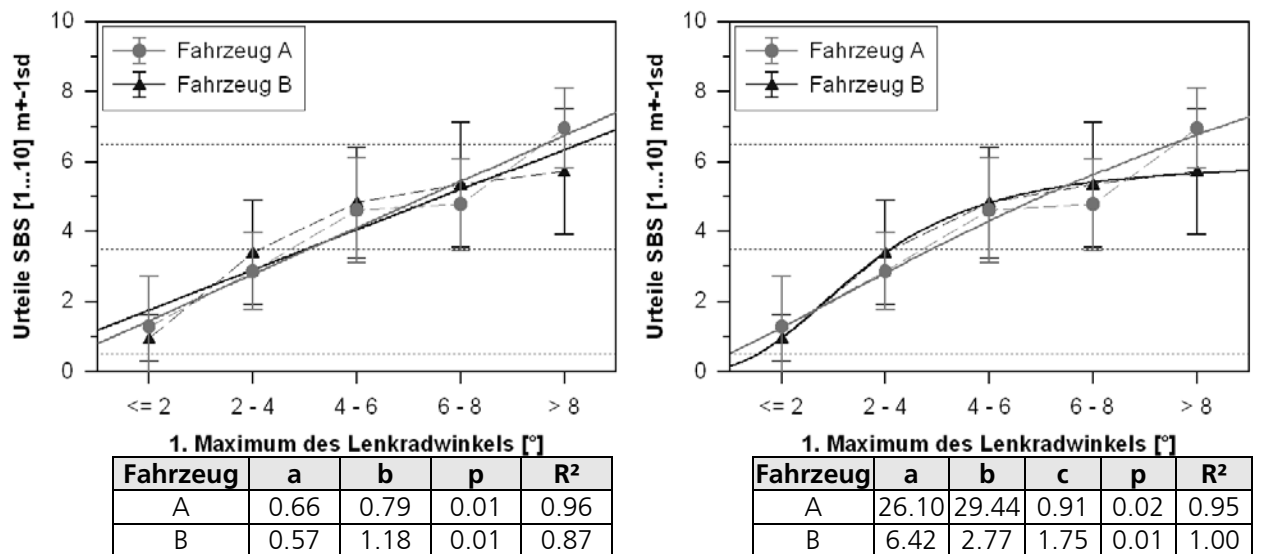


Abbildung 5-5: Bewertung des aufgetretenen Lenkradwinkels der Fahrzeugvarianten A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer (links) und Sigma-Anpassung (rechts).

Die Vermutung, dass die schneller wahrzunehmenden Kräfte die Führungsgröße für den Fahrer darstellen, bestätigt sich nicht: Zwar ist der allgemeine Zusammenhang von Lenkmoment und subjektivem Urteil relativ hoch, allerdings wird das maximale Lenkmoment nach Aufschaltung in den unterschiedlichen Fahrzeugabstimmungen verschieden bewertet (Abbildung 5-6). Das Maximum des Lenkmoments hängt daher zwar mit einer Führungsgröße zusammen, wird aber über die Eigenschaften des Lenkungsstrangs moderiert und dient dem Fahrer nicht direkt für die Störungsbewertung. Aufgrund der relativ geringen Korrelation dieses Parameters mit den weiteren betrachteten bleibt jedoch zu prüfen, inwiefern dieser Parameter zusätzliche Informationen für die Prädiktion des Fahrerurteils beinhaltet. So können

große Lenkmomente unabhängig von Lenkwinkelmaxima und großen Gierreaktionen auftreten, wenn diese durch Haltekräfte des Fahrers kompensiert werden können.

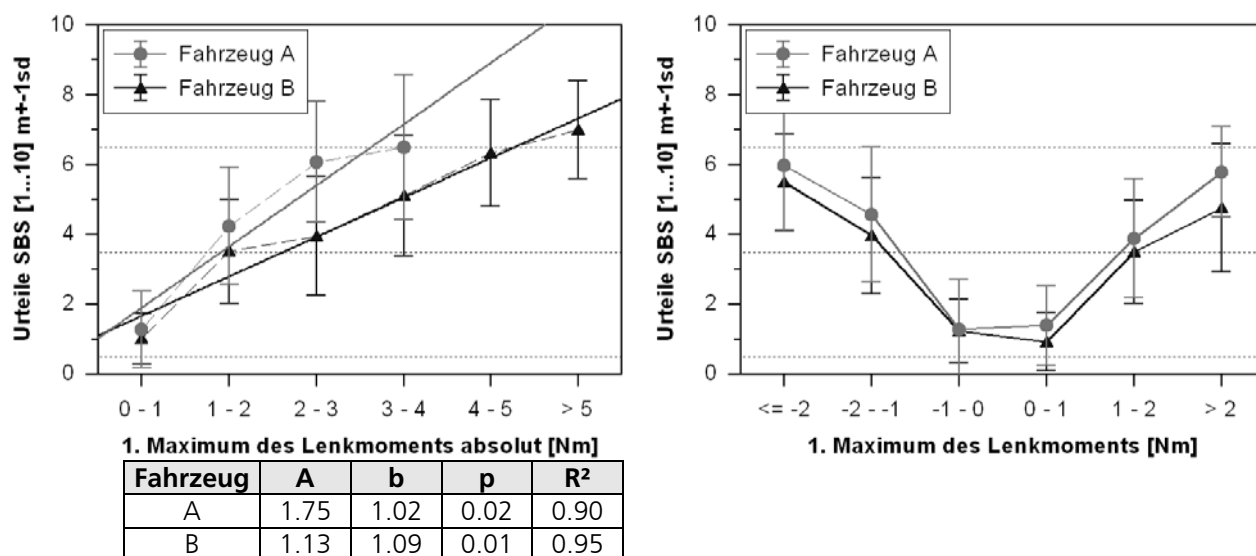


Abbildung 5-6: Bewertung der aufgetretenen Lenkmomente der Fahrzeugvarianten A und B aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer Anpassung (links).

Die Urteile des Fahrers lassen sich hier am besten durch die Kennwerte von Lenkradwinkel und Gierreaktion bzw. Querbeschleunigung erklären. Ob der Fahrer die Veränderungen in diesen Parametern in der Hauptsache über seinen haptischen, den kinästhetischen oder den visuellen Kanal wahrnimmt kann nicht eindeutig geklärt werden. Die schnellen Reaktionszeiten lassen eine Reaktion auf haptische oder kinästhetische Reizung vermuten. Über den Vergleich der Zusammenhänge von Fahrzeugreaktion und Urteil im Fahrsimulator wird dieser Gedanke im nächsten Abschnitt überprüft.

5.3 Der Einfluss der Kinästhesie

In den vorherigen Betrachtungen hat sich der bedeutendste Zusammenhang von subjektiver Bewertung und objektivem fahrdynamischen Parameter mit der Lenk-, Gier- und Querbeschleunigungsreaktion des Fahrzeugs erwiesen. Bislang ist nicht geklärt, ob für den Fahrer die kinästhetische Rückmeldung aus der Fahrzeugbewegung im Vordergrund steht, oder aber er die haptische Rückmeldung aus der Bewegung des Lenkrades wesentlich für sein Urteil ist. Wünschenswert für die Untersuchung dieser Frage ist eine Versuchsanordnung, in der die kinästhetische Rückmeldung variiert werden kann. Sofern der Fahrer auf diesen Anteil der Informationsrückmeldung angewiesen ist, sollte er bei Ausbleiben dieser Reaktion deutlich geringere Urteile abgeben als in vergleichbarer Situation mit vollständiger Rückmeldung der Fahrzeugbewegung. Geeignet erscheint der Vergleich eines Realfahrzeugs mit einem Simulator ohne Bewegungsrückmeldung, in dem Fahrer die Bewegungsinformation des Fahrzeugs lediglich über den visuellen Kanal zur Verfügung steht. Trotz der unterschiedlichen verwendeten Fahrzeugmodelle liefert der Vergleich der vorliegenden Daten aus Realfahrzeug und Simulator erste Hinweise auf die Wichtigkeit der kinästhetischen Rückmeldung der Fahrzeugbewegung bei der Wahrnehmung der Auswirkungen von zusätzlichen Lenkmomenten.

Die Analyse der Zusammenhänge von Urteil und der Lenkradbewegung der Fahrzeuge bzw. des Fahrsimulators zeigt: Insgesamt sind in der Simulatorstudie deutlich höhere maximale

Lenkradwinkel zu beobachten als in den Fahrzeugen. Gleichzeitig erscheint der Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und dem Fahrerurteil im Simulator deutlich flacher als in den Fahrzeugen (Abbildung 5-7).

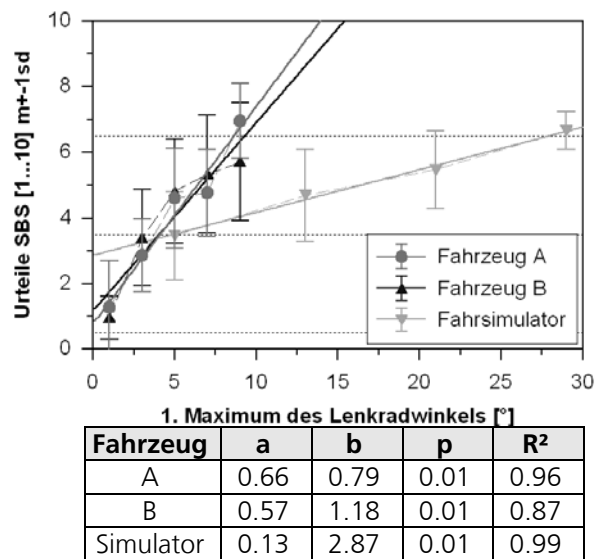


Abbildung 5-7: Vergleich Bewertungen in Fahrzeug A und B gegenüber dem Fahrsimulator in Bezug auf das 1. Maximum des Lenkradwinkels mit linearer Anpassung.

Im vorangegangenen Abschnitt konnte ermittelt werden, dass die Kraftrückmeldung aus dem Lenkungsstrang relativ schwach mit dem Fahrerurteil korreliert. An dieser Stelle kann nicht ausgeschlossen werden, dass die unterschiedliche Steigung auf die unterschiedliche Lenkübersetzung zurückgeführt werden kann. Allerdings ist aus dem Vergleich der drei Lenkungsabstimmungen offensichtlich, dass allein die Lenkradbewegung und die damit verbundene haptische Rückmeldung nicht das Fahrerurteil bestimmt.

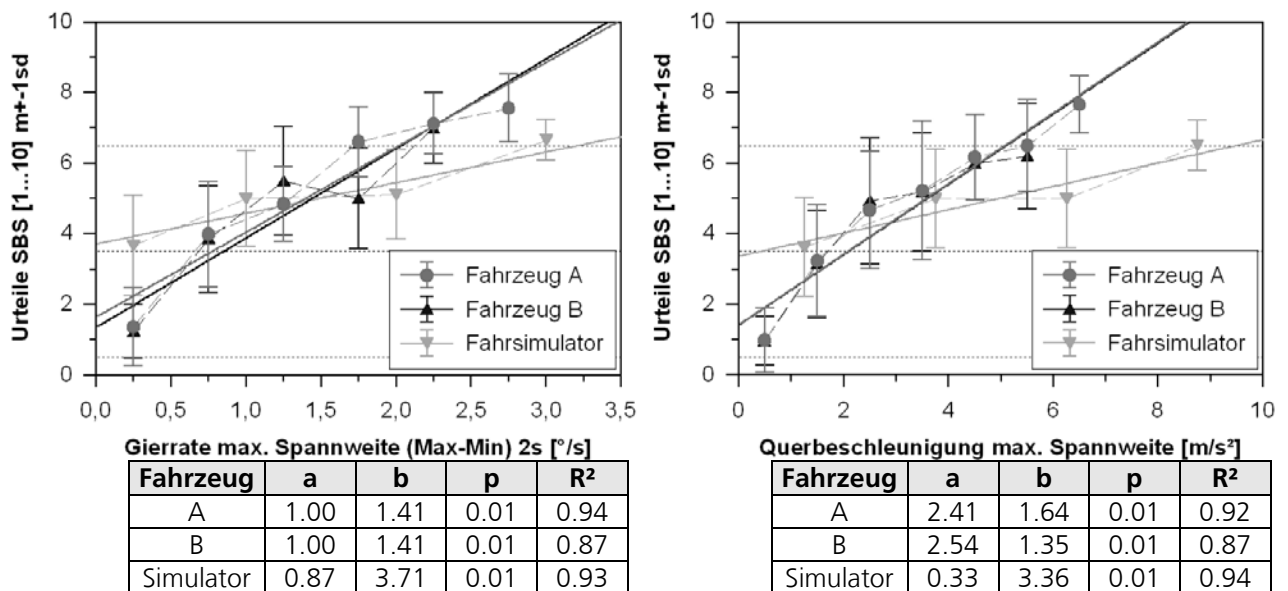


Abbildung 5-8: Vergleich Bewertungen in Fahrzeug A und B gegenüber dem Fahrsimulator in Bezug auf die Gierrate (links) und Querbeschleunigung (rechts) mit linearer Anpassung.

Die querdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs unterstreichen dieses Bild (Abbildung 5-8). Zwar fällt der Unterschied zwischen Fahrsimulator und den beiden Realfahrzeugen weniger extrem aus, aber auch hier scheint die fehlende kinästhetische Rückmeldung den Zusammenhang von den Kennwerten des Fahrzeugzustandes und der Bewertung des Fahrers abzuschwächen. Im Simulator kann der Fahrer insbesondere die Querbeschleunigung nicht mehr

direkt wahrnehmen, weder kinästhetisch noch visuell. Die Verschiebung der Zusammenhänge von subjektivem mit objektiven Kennwerten kann daher als Indiz für die Wichtigkeit der Querschleunigungsreaktion für den Fahrer gewertet werden. Die Ergebnisse unterstreichen die Wichtigkeit der kinästhetischen Rückmeldung für die Querregelung des Fahrzeugs und deren Dominanz der Störungsbewertung gegenüber alleiniger haptischer Rückmeldung z.B. über den Lenkradwinkel.

5.4 Validierung über Variation des Fahrzeugmodells

In einer weiteren Studie (Abschnitt 3.3.4) wurde ein VW Passat (Fahrzeug C) eingesetzt und sprungförmige Zusatzmomente in unterschiedlichen Fahrsituationen aufgeschaltet. Hier werden Messungen aus dem Fahrmanöver „Engstelle“ mit den Störungsauswirkungen aus der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Studie bei Geradeausfahrt verglichen und damit unterschiedliche Fahrzeugmodelle gegenübergestellt (VW Passat vs. 2 VW Touran). Zwar unterschieden sich neben den Fahrzeugen auch die Fahrsituationen und die Amplituden der Zusatzmomente geringfügig, dennoch erscheint ein Vergleich sinnvoll, um weitere Aufschlüsse über die Führungsgröße des Fahrers zu gewinnen.

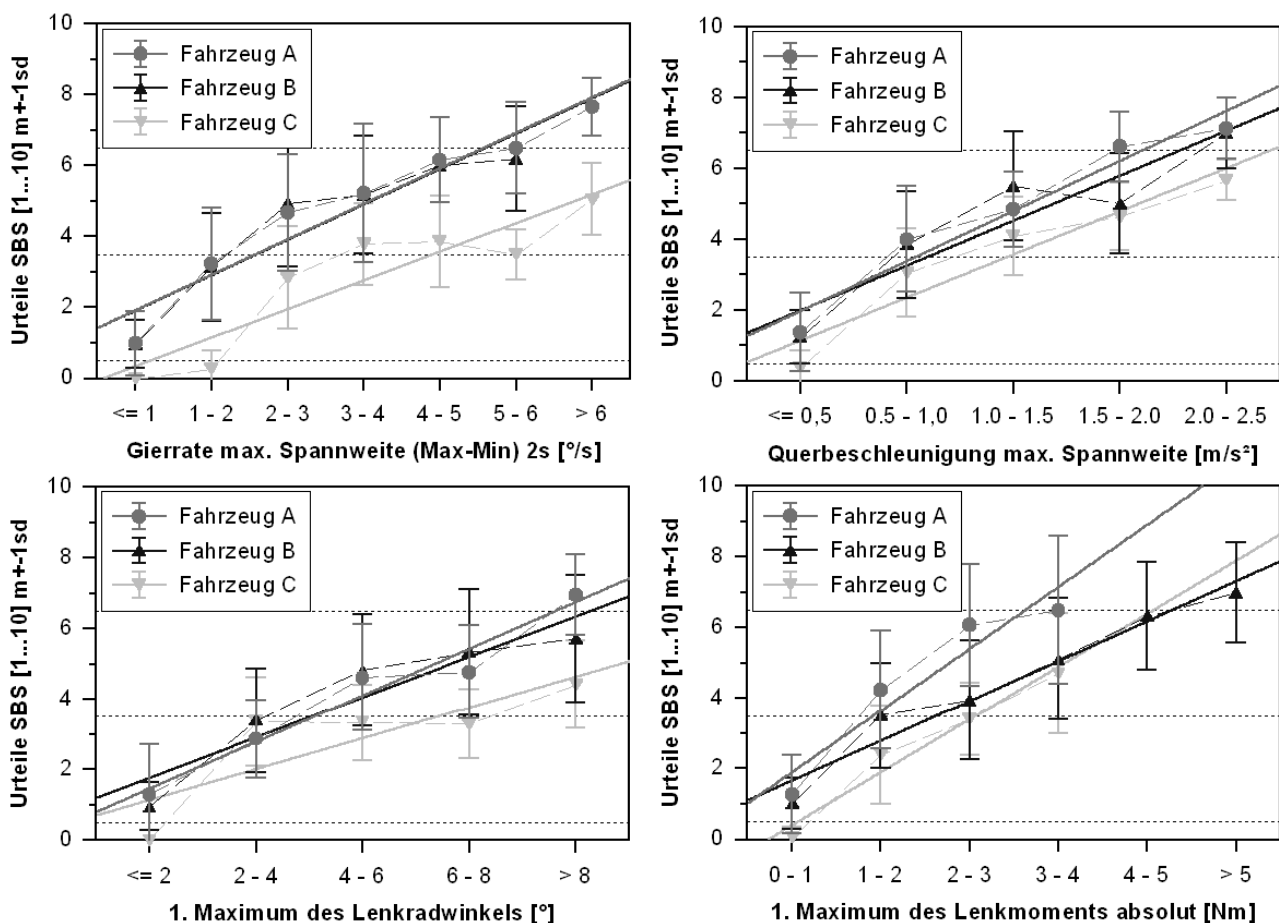


Abbildung 5-9: Bewertung in Bezug zu aufgetretenen Fahrzeugreaktionen Gierrate und Querschleunigung, dem Maximum des Lenkradwinkels und des gemessenen Lenkmoments der Fahrzeuge A, B und C aufgrund der Zusatzlenkmomente mit linearer Anpassung.

Abbildung 5-9 zeigt die subjektiven Bewertungen der aufgeschalteten Zusatzmomente in Relation zu fahrphysikalischen Parametern für die Fahrzeuge A, B und C. Dabei ist auffällig, dass in Fahrzeug C gleichstarke Fahrzeug- und Lenkbewegungen mit geringer störenden

Bewertungen einhergehen: Der für die sehr ähnlichen Fahrzeugmodelle A und B gezeigte übereinstimmende Zusammenhang zwischen Bewertung und Fahrzeugreaktion erscheint dagegen im Niveau verschoben.

Als deutlich ähnlicher über die drei Fahrzeuge erweist sich der Zusammenhang von Bewertung und maximaler Spannweite der Querschleunigung nach Aufschaltung eines Zusatzmoments. Als eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugtypen Touran (A, B) und Passat (C) ist neben den verschiedenen Fahreigenschaften insbesondere auf die deutlich höhere Sitzposition im Touran zu verweisen. Die Kennwerte der Querschleunigung und der Gierrate sind hingegen auf die Schwerpunktlage des Fahrzeugs bezogen und nicht auf die Kopfposition des Fahrers. Über das dort angesiedelte Gleichgewichtsorgan nimmt der Fahrer die Fahrzeugbewegungen wahr. Eine erhöhte Sitzposition geht in der Regel mit höheren Querschleunigungen in Kopfhöhe einher. Dies könnte die Niveaushiftung in dieser Betrachtung erklären. Diese Ergebnisse stützen die bisherige Vermutung, dass die Querschleunigung die Störungsbewertung durch den Fahrer am besten vorhersagt.

5.5 Steilheit des Zusatzmomentenanstiegs

Über die Variation der Signalform der aufgeschalteten Lenkmomente sollen die bislang identifizierten Zusammenhänge überprüft werden. Dargestellt wurden neben sprungförmigen auch rampenartige Zusatzmomente mit begrenzter Anstiegssteilheit. Es werden ausschließlich Zusatzmomente betrachtet, die in Fahrzeug A gestellt wurden. Für eine genaue Versuchsbeschreibung sei auf Abschnitt 3.3.1 verwiesen.

Hinsichtlich der Gierreaktion und dem ersten Maximum des Lenkradwinkels nach Störungsaufschaltung liegt das Niveau der Bewertungen bei rampenartigen Momenten nicht immer auf der Höhe der Bewertungen bei sprungförmigen Momenten (Abbildung 5-10). Insbesondere im Bereich geringer Fahrzeugreaktionen, aber auch bei den größten beobachteten Reaktionen laufen die Bewertungen deutlich auseinander. Besser geeignet erscheint die gemessene maximale Querschleunigung. Hinsichtlich der Spannweite des Lenkradwinkels und des maximalen Lenkmoments direkt nach Störungsaufschaltung bricht der Zusammenhang zum Urteil für die langsam ansteigenden Zusatzmomente völlig zusammen. Die über das Lenkrad vermittelten haptischen Einflüsse treten gegenüber den Bewegungen des Fahrzeugs, die kinästhetisch zurückgemeldet werden, vollkommen in den Hintergrund. Zu berücksichtigen ist, dass die Kategorien aufgrund der ex post Klassifikation insbesondere bei den größten beobachteten Werten mit sehr geringen Fallzahlen bestückt sein können.

Als Erklärung lässt sich die unterschiedliche Charakteristik der Störungen anführen: Die sprungförmigen Momente führen zu schnellen heftigen Reaktionen des Fahrzeugs, die dann vom Fahrer ausgeglichen werden. Die langsamen Anstiege der rampenartigen Zusatzmomente erlauben dem Fahrer schon ein Kompensieren noch während sich die Störung aufbaut. Maße, die den Verlauf der Störungskompensation stärker berücksichtigen als die hier betrachteten Extremwerte könnten diesem Umstand möglicherweise Rechnung tragen. Zu berücksichtigen ist jedoch auch, dass eine Kompensation des Fahrers durch die Übertragungsfunktion des Fahrzeugs moderiert wird. Dies erschwert eine Ermittlung fahrzeugunabhängiger Parameter wesentlich.

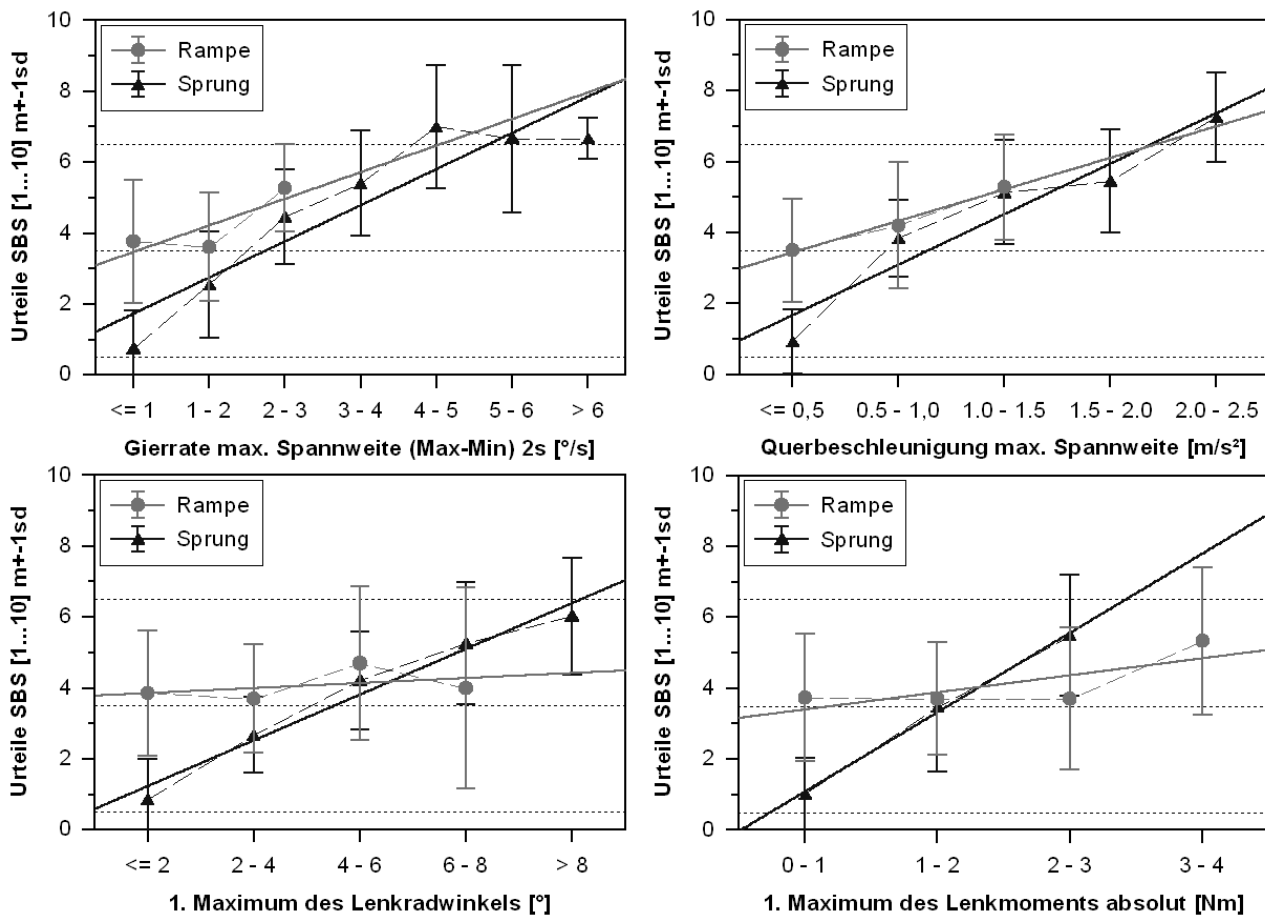


Abbildung 5-10: Bewertung der aufgetretenen Gier- und Lenkungsreaktionen aufgrund der angeforderten sprung- und rampenförmigen Zusatzlenkmomente. Fahrzeugreaktionen ex post kategorisiert; den Kategorien liegen unterschiedliche Häufigkeiten zugrunde.

5.6 Variation der Fahrsituation

Es zeigt sich auch in der Kurve eine Abhängigkeit der Bewertung von der Spannweite der Querbeschleunigung. Allerdings werden auf der Geraden Fahrzeugreaktionen als störender bewertet als gleichstarke in der Kurve - bei ähnlich starken Reaktionen des Fahrzeugs auf Störungsanregungen. Da im Unterschied zur Geradeausfahrt in der Kurve bereits eine erhöhte querdynamische Beanspruchung vorliegt, erscheint dieses Grundniveau die Bewertung fahrdynamischer Reaktionen auf Anregungen im Lenkungsstrang zu beeinflussen. In Abschnitt 4.1.1 konnte gezeigt werden, dass durch die Einschränkung der Spurbreite durch Pylonen und die damit einhergehende bessere Referenz gleiche Störungen als störender bewertet werden als auf freier gerader Strecke.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Zusammenhang von tatsächlich aufgetretener Fahrzeugreaktion und der Störungsbewertung durch den Fahrer untersucht. Durch die Lenkmomentaufschaltungen werden Kräfte in den Lenkungsstrang geleitet. Offen ist, ob der Fahrer eben diese Kräfte im Lenkrad als wesentlich wahrnimmt, oder ob er die Reaktion des Fahrzeugs darauf bemerkt. Möglicherweise beeinflussen die resultierenden Lenkrad- oder Fahrzeugbewegun-

gen sein Urteil. Damit stellt sich die Frage nach der Führungsgröße des Fahrers beim Ausregeln von Anregungen im Lenkungsstrang.

Um den Einfluss des Lenkmoments auf das Urteil des Fahrers zu identifizieren, wurden gleiche Lenkmomente in zwei vergleichbaren Fahrzeugen mit unterschiedlicher Lenkungsabstimmung gestellt. Die angeforderten Zusatzmomente werden durch das Übertragungsverhalten des Lenkungsstrangs moderiert. Wenn die im Lenkrad wahrnehmbaren Kräfte wesentlicher Faktor bei der Wahrnehmung sind, sollten in beiden Fahrzeugen gleiche aufgetretene Momente identisch bewertet werden. Dies ist nicht der Fall. Auch für den maximalen Lenkradwinkel ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang, wie über Variation des Fahrzeugverhaltens im Simulator gezeigt werden konnte. Zwar ist der taktile Apparat des Menschen am besten in der Lage, Druckveränderungen wahrzunehmen. Entgegen diesen theoretischen Überlegungen besitzt die Geschwindigkeit des Lenkradwinkels aber kaum Erklärungswert für das Fahrerurteil.

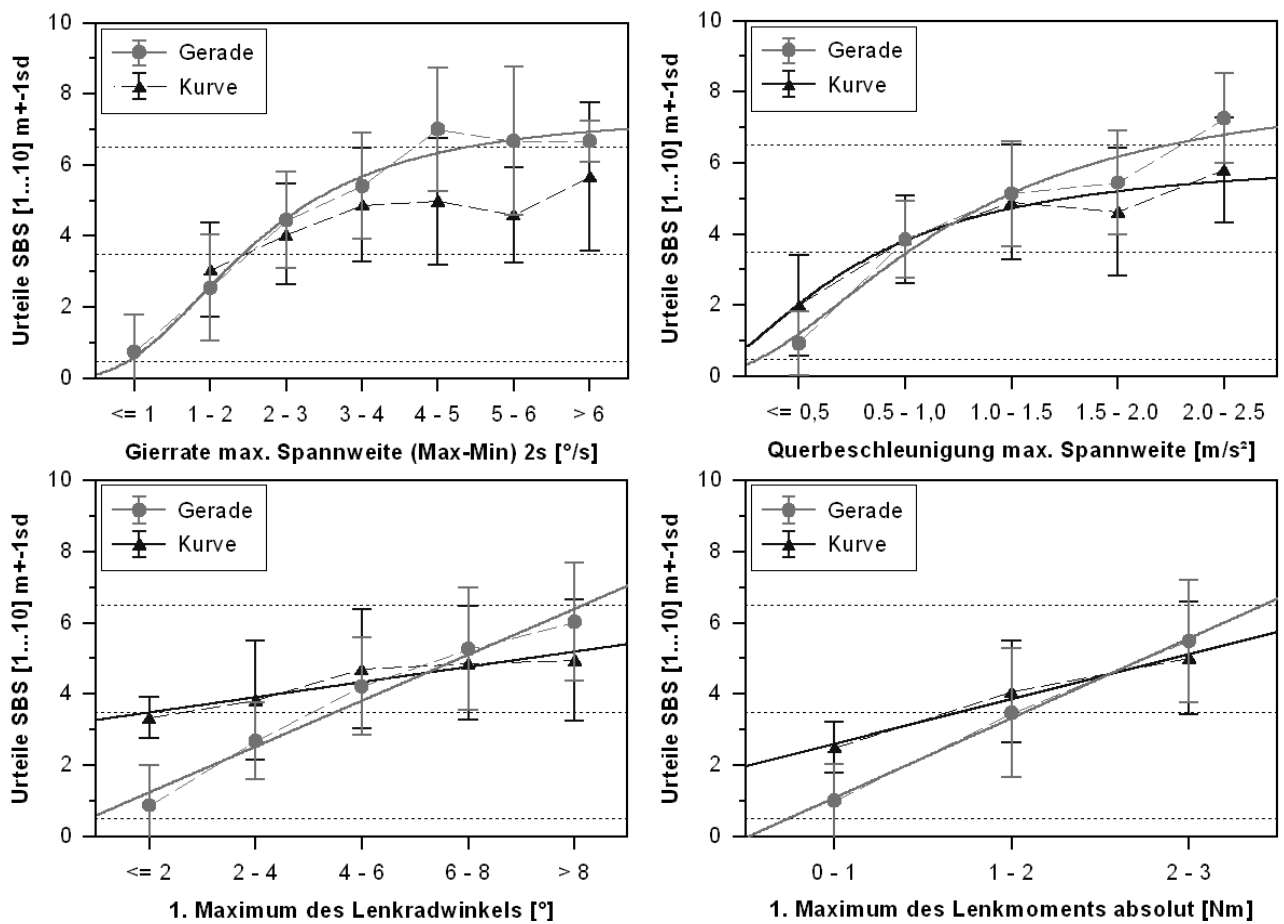


Abbildung 5-11: Bewertung der aufgetretenen Gierreaktionen und Querbeschleunigungen auf gerader Strecke und in der Kurve. Die Fahrzeugreaktionen sind ex post kategorisiert; den Kategorien liegen unterschiedlichen Häufigkeiten zugrunde.

Wenn die Bewertungen dagegen auf die extrahierten Kennwerte der Fahrzeugreaktion, Spannweite der Gierrate und Querbeschleunigung, bezogen werden, zeigt sich für beide Fahrzeuge ein nahezu identischer Zusammenhang. Da beide Kennwerte über das Fahrzeugmodell hochgradig korrelieren, kann kaum eindeutig geklärt werden, welcher dieser beiden Parameter wesentlich ist. Aus dem Vergleich der Anregungen in Fahrzeugmodellen mit unterschiedlichem Übertragungsverhalten erscheint die Spannweite der Querbeschleunigung als geeignetster Kennwert zur Vorhersage des Fahrerurteils. Eine Niveauverschiebung dieses

Zusammenhanges zwischen den Fahrzeugen zeigt gleichzeitig die Grenzen dieses Kennwertes auf. Denkbar ist, dass die Spannweite der Querbeschleunigung am besten mit der „wahren“ Führungsgröße korreliert. Möglicherweise ist Varianz auch über die Verbaulage der Messsensoren aufgetreten. So wird die Querbeschleunigung in beiden Fahrzeugen schwerpunktnah gemessen. Der Fahrer nimmt die Beschleunigung jedoch in Höhe seines Kopfes wahr. Die unterschiedliche Sitzposition in den Fahrzeugen VW Touran und VW Passat unterstützt diese Vermutung.

In weiteren Schritten wäre denkbar, diese Wahrnehmungszusammenhänge präziser aufzulösen. So ist einerseits eine Messung der Querbeschleunigung in Kopfnähe des Fahrers zu empfehlen und gleichzeitig die Aufspaltung der dynamischen Zusammenhänge im Fahrzeug, um die jeweiligen Einflüsse isoliert betrachten zu können. Ein Ansatz dazu wird in [SSN+06] beschrieben. Denkbar ist dies auch über einen Fahrsimulator mit Bewegungssystem. Zu fordern sind dabei strenge Vorgaben hinsichtlich der einzuhaltenden Zeitverzögerungen zwischen haptischer und kinästhetischer Rückmeldung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer nicht ausschließlich auf eine einzige Bewegungsgröße reagiert. Der Fahrer ist vielmehr als Mehrgrößensystem mit multiplen Eingängen zu verstehen. Um die Wahrnehmung des Fahrers besser abbilden zu können, erscheinen daher im nächsten Schritt multifaktorielle Ansätze als sinnvoll. Aufgrund der hohen Interkorrelationen im Fahrzeug scheiden Regressionsansätze aus. Denkbar erscheint, die Zusammenhänge der hier aufgeführten Kennwerte mit dem Fahrerurteil über ein Bayessches Netz [Nea03] zu modellieren, in dem die Abhängigkeiten zwischen den Kennwerten berücksichtigt werden.

1	Es wurde der Versuch unternommen, die Führungsgröße des Fahrers bei der Wahrnehmung und Reaktion der Auswirkungen zusätzlicher Lenkmomente zu ermitteln.
2	Die Ergebnisse legen nahe, dass das Moment oder die Lenkradbewegung für den Fahrer nicht die wesentlichen Parameter bei der Wahrnehmung durch Lenkmomente eingeleiteter Störungen sind.
3	Deutlich stärker erweist sich in den vorliegenden Daten der Zusammenhang zwischen Bewertung der Störung und den hier extrahierten fahrphysikalischen Kennwerten der Querbeschleunigung und der Gierreaktion. Diese Parameter erklären das Fahrerurteil besser als Reaktionen im Lenkrad.
4	Die Betrachtung eines einzelnen Parameters erscheint als nicht optimal. Es wird vorgeschlagen mittels geeigneter Verfahren (z.B. Bayesscher Netze) multiple Einflussgrößen zu berücksichtigen.

Tabelle 5-2: Kurzübersicht der zentralen Ergebnisse von Kapitel 5.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.1 Gestaltungsempfehlungen für Zusatzlenkmomente im Fahrzeug

Die durchgeführten Untersuchungen hatten zum Ziel, Eingriffe in den Lenkungsstrang über zusätzlich aufgeschaltete Lenkmomente zur Unterstützung des Fahrers hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit (Controllability [PRE06]) zu evaluieren. So ist bei solchen Eingriffen der Nachweis zu erbringen, dass der Fahrer stets in der Lage ist, die Eingriffe zu übersteuern und das Fahrzeug jederzeit zu kontrollieren. Hierzu wurden Einflussfaktoren auf der Signalseite, wie der Signalstärke und der Steilheit des Anstiegs, sowie die Auswirkungen in unterschiedlichen Fahrmanövern betrachtet. Daneben wurden Variationen auf Seiten des Fahrzeugmodells oder situativen Parametern durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich Gestaltungsempfehlungen für Zusatzlenkmomente im Fahrzeug ableiten, die das Design dieser Unterstützungseingriffe in anderen Fahrzeugen oder Systemkontexten als dem hier fokussierten Spurführungssystem erleichtern sollen. Der Einsatz dieser haptischen Signale erscheint aufgrund des großen Potentials dieser Modalität zur Information des Fahrers wünschenswert (siehe Abschnitt 2.2). Gleichzeitig zeigen empirische Befunde aus der Literatur, dass dieses Potential bei unangemessener Gestaltungen der Signale nicht nur unausgeschöpft bleibt, sondern diese Signale sich sogar nachteilig auf das Fahrer-Fahrzeug-System auswirken können. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer sorgfältigen Auslegung solcher Zusatzlenkmomente. In diesem Abschnitt werden daher die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zur Signalausgestaltung dargestellt.

6.1.1 Trade-off von Amplitude und Anstiegssteilheit

Als bedeutsamster Faktor bei der Betrachtung der Auswirkung von zusätzlichen Lenkmomenten auf das Fahrer-Fahrzeug-System hat sich die Anstiegssteilheit erwiesen. Während die meisten bisherigen Forschungsanstrengungen die Amplitude eines solchen Zusatzmoments als wesentlich erachtet und daher fokussiert haben, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit ein umfassenderes Bild: So ist die Amplitude eines Zusatzmoments ein wesentlicher Einflussfaktor, der hochgradig mit der resultierenden Fahrzeugreaktion und der subjektiven Störungsbewertung des Fahrers zusammenhängt.

Dies gilt jedoch lediglich für schnell ansteigende Zusatzmomente. Durch die Verringerung der Anstiegssteilheit des Signals verringert sich der Einfluss der Amplitude immer weiter und verschwindet bei hinreichend langsamem Anstieg. Zumindest innerhalb des in dieser Arbeit untersuchten Bereichs der Amplitude konnte festgestellt werden, dass der Fahrer bei geringen Anstiegssteilheiten in der Lage ist, Zusatzmomente unabhängig von ihrer Amplitude gleichermaßen zu kompensieren. Die Anstiegssteilheit wirkt nicht nur moderierend auf die Amplitude, sondern besitzt auch selbst einen starken Einfluss auf Wahrnehmung und Reaktionen des Fahrers bei applizierten Zusatzmomenten.

Auf Seiten der Signalgestaltung zeigt sich ein Zielkonflikt: Signale mit sehr großer Amplitude sind nur bei geringer Dynamik jederzeit beherrschbar. Sollte eine hohe Dynamik erforderlich sein, begrenzt dies folglich die maximal zumutbare Amplitude. Umgekehrt lässt sich aus der Zielerwartung solcher Signale in der Lenkung oftmals schnell identifizieren, welche der beiden Anforderungen im Vordergrund steht. So besitzt ein Spurführungssystem, das den Fahrer auf der Manöverebene unterstützt, deutlich geringe Anforderungen an die Dynamik als ein System zur Fahrzeugstabilisierung, das möglichst schnell kritischen Zuständen entgegen wirken soll. In der Regel benötigt ein solches System allerdings keine starken Eingriffe. Vielmehr reichen die sehr schnellen, kurzen und begrenzt starken Eingriffe zum Stabilisieren vollkommen aus. Für ein Fahrerassistenzsystem ergeben sich höhere Amplituden möglicherweise aus den funktionalen Anforderungen. So sind zur Unterstützung der Spurhaltung des Fahrers bei enger Kurvenfahrt höhere Amplituden notwendig als auf gerader Strecke. Als Gestaltungsempfehlung ist festzuhalten, dass auf Seiten der Signalgestaltung schon eine hinreichende Limitierung eines der beiden Faktoren eine gute Kontrollierbarkeit der resultierenden Signale gewährleistet. Daher sollten die Anforderungen der Zielerwartung eines solchen Signals hinsichtlich ihrer Anforderungen an Dynamik und Amplitude genau geprüft werden.

Hinsichtlich absoluter Grenzwerte kann hier festgehalten werden, dass es kaum möglich ist, Grenzwerte für das Signal anzugeben. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Fahrer nicht das Lenkmoment, sondern die resultierende Fahrzeugbewegung als wesentlich wahrnimmt. Diese wird durch das Fahrzeugmodell und seine Übertragungseigenschaften bestimmt. Daher sind Aussagen zur Kontrollierbarkeit von Zusatzmomenten zum derzeitigen Stand nicht ohne weiteres auf andere Fahrzeuge übertragbar.

6.1.2 Die Bedeutung des Fahrmanövers

Im Rahmen dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass Zusatzmomente in Fahrmanövern mit starker Lenktätigkeit (hier: Spurwechsel) vom Fahrer als weniger beeinträchtigend wahrgenommen werden. Zwar ist davon auszugehen, dass diese Fahrmanöver gegenüber stationären Manövern (hier: Geradeaus- und Kurvenfahrt) eine erhöhte Schwierigkeit aufweisen. Allerdings erscheint ein Zusatzmoment während einer aktiven Bewegungsausführung des Fahrers in den Hintergrund zu treten. Der Fahrer befindet sich in diesem Fall bereits in der Ausregelung einer Zielbewegung und hat daher weniger Probleme, diese Zusatzmomente schnell und adäquat auszuregeln. Während stationärer Manöver treten die Auswirkungen der Zusatzmomente dagegen deutlicher in den Vordergrund. Dabei sind Aufschaltungen in Kurven nicht als schwerwiegender zu betrachten als Aufschaltungen auf gerader Strecke. Auch wenn Zusatzmomente in Richtung Kurveninnen zu leicht erhöhten Reaktionen des Fahrzeugs führen, werden diese nicht als stärker störend bewertet.

Als sensitivster Fall erweist sich die Geradeausfahrt mit stark limitierter Spurbreite (hier: Engstelle mit 2.5m Pylonengasse). Die Begrenzung erhöht einerseits die Schwierigkeit des Fahrmanövers und limitiert die mögliche Querabweichung. Gleichzeitig liefert diese Situation dem Fahrer die beste Referenz für die Bewertung seiner Fahrleistung. Als Fazit lassen die Ergebnisse dieser Arbeit darauf schließen, dass vergleichbare zusätzliche Lenkmomente am

stärksten in der beschriebenen Engstelle bewertet werden. Daher sollte eine Prüfung der Kontrollierbarkeit von Zusatzmomenten dieses Fahrmanöver berücksichtigen.

Einschränkend muss angeführt werden, dass komplexe Fahrsituationen, wie sie häufig in geringeren Geschwindigkeitsbereichen auftreten (z.B. Kreuzungen und Abbiegemanöver) hier nicht betrachtet wurden. Diese Situationen sind aufgrund des Einsatzgebietes derzeitiger Umsetzungen von Spurführungssystemen im höheren Geschwindigkeitsbereich (>60km/h) nicht relevant.

6.1.3 Situative Parameter und Fahrzeugeigenschaften

In dieser Arbeit wurden neben Einflussfaktoren auf der Signalseite und unterschiedlichen Fahrmanövern die Auswirkungen von Geschwindigkeit, einer Aktivierung einer Spurführungsassistentz und der Fahrzeugeigenschaften betrachtet.

Für die Geschwindigkeit zeigt sich in den hier untersuchten Abstufungen von 70 und 100km/h kein Einfluss auf die betrachteten Kennwerte der Fahrzeugreaktion und der Bewertung durch den Fahrer. Es ist darauf hinzuweisen, dass schon über die Grundabstimmung der Elektromechanischen Servolenkung versucht wird, die Auswirkungen von Lenkungseingriffen möglichst geschwindigkeitsunabhängig zu gestalten. Wie eine extremere Abstufung der Geschwindigkeit auf den Fahrer wirkt, wurde in dieser Arbeit nicht mit Probanden untersucht. Allerdings ist bei gegenwärtigen Fahrzeugen bei deutlich höheren Geschwindigkeiten in der Regel von einer Zunahme der Gierdämpfung auszugehen. Die Auswirkungen von Anregungen über Lenkmomentbeaufschlagung sollten daher geringer ausfallen. Dies bleibt jedoch experimentell zu belegen. Der untere Geschwindigkeitsbereich kann für die in dieser Arbeit betrachteten Fahrmanöver als unproblematisch erachtet werden. Zum einen treten kaum stärkere Reaktionen des Fahrzeugs auf. Zum anderen hat der Fahrer mehr Zeit zum Ausregeln einer Anregung.

Die Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente bei gleichzeitig aktivierter Spurführungsassistentz zeigt wiederum eine Abhängigkeit von der Anstiegssteilheit der Signale. So ist dieser Faktor bei sprungförmig aufgeschalteten Momenten unwirksam. Erst bei Signalen mit stark begrenzter Anstiegssteilheit sind durch die gleichzeitigen Lenkungseingriffe der Spurführungsassistentz leicht erhöhte fahrdynamische Auswirkungen und Bewertungen zu beobachten. Allerdings bleiben diese unter den untersuchten Umständen stets im tolerablen Bereich und führen nicht zu Spurverletzungen. Erklärt wird dieser Effekt mit der Erhöhung der Grundaktivität in der Lenkung durch die Eingriffe des Spurführungssystems. Dieses „Rauschen“ erschwert dem Fahrer die Identifikation der langsamen Zusatzmomente, die sich beim Aufbau kaum von den Regeleingriffen des Spurführungssystems unterscheiden. Aus der späteren Reaktion des Fahrers ergeben sich in diesem Fall stärkere Fahrzeugreaktionen, die mit leicht erhöhten Bewertungen einhergehen. Es ist jedoch zu vermuten, dass dieser Effekt nur solange besteht, wie die Auswirkungen der Zusatzmomente unkritisch sind. Stärkere Aufschaltungen sollten trotz des erhöhten Grundrauschens schnell und eindeutig identifiziert werden können, so dass in diesem Fall keine stärkeren Fahrzeugreaktionen zu erwarten sind.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde eine Variation der Fahrzeugeigenschaften über die Modifikation von Lenkungsparametern und die Untersuchung unterschiedlicher Fahrzeugmo-

delle geleistet. Beide Veränderungen führen zu Unterschieden in den Auswirkungen und den Bewertungen der Zusatzmomente. In einem ersten Schritt wird daher geschlussfolgert, dass für den Fahrer nicht die Zusatzmomente an sich bedeutsam sind, sondern die daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen. Daher gelten Aussagen zu Auswirkungen von Zusatzmomenten immer nur für das jeweils untersuchte Fahrzeug. Auch wenn die generellen Wirkzusammenhänge zwischen den Fahrzeugen konstant bleiben, ist eine Übertragung absoluter Grenzwerte aus diesem Grund nicht möglich.

Die Betrachtung der Auswirkungen von Zusatzmomenten bei veränderter Abstimmung des Lenkungsstrangs zeigt dagegen, dass bei gleichen Auswirkungen in den Fahrzeugreaktionen übereinstimmende Bewertungen abgegeben werden. Daher ist zu vermuten, dass Lenkmomente in beliebigen Fahrzeugen immer dann als kontrollierbar anzusehen sind, wenn sie zu gleichen fahrdynamischen Reaktionen wie in einem Referenzfahrzeug führen und diese dort als kontrollierbar identifiziert wurden. Diese Hypothese muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

6.2 Das Übertragungsverhalten des Fahrers

Neben der Betrachtung der Auswirkungen und Bewertung von zusätzlich aufgeschalteten Lenkmomenten können aus den Ergebnissen Erkenntnisse zu den Wahrnehmungszusammenhängen des Fahrers bei fahrdynamischen Anregungen gewonnen werden. Damit wird angestrebt, die dahinterliegenden Wahrnehmungsprozesse zu identifizieren und die Eigenschaften des Fahrers bei der Reaktion auf Anregungen über zusätzliche Lenkmomente zu beschreiben.

6.2.1 Führungsgröße und sensorische Verarbeitung

Während der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden zusätzliche Lenkmomente als fahrdynamische Anregungen aufgeschaltet. Im System Fahrzeug führen diese eingebrachten Kräfte zu Reaktionen im Lenkungsstrang und in den Bewegungsgrößen des Fahrzeugs. Die Zusammenhänge können über ein entsprechendes Fahrzeugmodell beschrieben werden. Offen ist bislang, welche dieser Anregungen der Fahrer wahrnimmt und welche der Zustandsgrößen für seine Reaktion und sein Urteil wesentlich sind. So ist denkbar, dass der Fahrer nicht auf die angeforderten Zusatzmomente reagiert, sondern vielmehr auf die dadurch hervorgerufenen Fahrzeugreaktionen. Dazu wurden die Bewertungen des Fahrers in Bezug zu den Veränderungen in den extrahierten Kennwerten der Lenkung (maximales Lenkmoment, Lenkradwinkelmaximum, Maximum der Lenkradwinkelgeschwindigkeit), des Fahrzeugs (Spannweite der Gier- und Querschleunigungsreaktion) und der Fahrerreaktion (Reaktionszeit) gesetzt.

Durch die Aufschaltung gleichartiger Zusatzmomente bei unterschiedlicher Lenkungsabstimmung und bei unterschiedlichen Anstiegssteilheiten zeigt sich, dass die angeforderten Lenkmomente nicht unmittelbar mit der Bewertung durch den Fahrer in Zusammenhang stehen. In der Literatur beschriebene Simulatorstudien [GSN+05] vermuten die Auslenkung des Lenkrades als beste objektive Schätzung für das Fahrerurteil. Dieser Gedanke wurde im

Realfahrzeug geprüft und über die Aufschaltung unterschiedlicher Anstiegssteilheiten und den Vergleich von Aufschaltung auf gerader Strecke sowie in der Kurve operationalisiert. In beiden Fällen sollten gleiche maximale Amplituden zu unterschiedlichen Auswirkungen in der Lenkung führen. Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese von [GSN+05] jedoch nicht. Vielmehr zeigt sich der maximale Lenkradwinkel über unterschiedliche Situationen und bei verschiedenen Signalformen als kaum geeignet, das Fahrerurteil vorherzusagen. Die Ergebnisse aus der Untersuchung eines weiteren Fahrzeugmodells unterstützen diese Schlussfolgerung. Auch die Lenkradwinkelgeschwindigkeit als Maß für die Heftigkeit der Fahrerreaktion liefert keine befriedigende Schätzung.

Als bester Schätzer für das Fahrerurteil erscheinen die Zustandsgrößen der Querbewegung des Fahrzeugs. Die hier extrahierten Kennwerte maximale Spannweite der Gier- und Querbesehleunigungsreaktion zeigen den besten Zusammenhang mit dem Urteil des Fahrers. Dieser Zusammenhang erweist sich als stabil über verschiedene Fahrsituationen und Signalparameter sowie die hier durchgeführten Veränderungen der Lenkungsabstimmung. Insbesondere bei Variation des Fahrzeugmodells erscheint der Kennwert der Querbesehleunigung der Gierreaktion in der Güte der Vorhersage überlegen.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die beste Schätzung der Bewertung einer Anregung im Lenkungsstrang über die Spannweite der Querbesehleunigung möglich ist. Zum einen ist dieses Ergebnis für die Bestimmung möglicher Eingriffe in unterschiedlichen Fahrzeugen von Interesse. So kann damit eine erste Näherung für kontrollierbare Zusatzmomente über die Analyse des Zusammenhangs von Zusatzmoment und Querbesehleunigungsreaktion erfolgen. So können diejenigen Zusatzmomente identifiziert werden, die in anderen Fahrzeugen zu Querbesehleunigungsreaktionen führen, die in einem Fahrzeug als kontrollierbar eingestuft werden. Damit wird eine Evaluation ökonomischer und schneller durchführbar. Zum anderen liefert dieses Ergebnis weitere Erkenntnisse zur Wahrnehmung des Fahrers bei fahrdynamischen Anregungen. Zwar existieren bereits erste Hinweise zur Wichtigkeit der Gierreaktion des Fahrzeugs auf die Bewertung einer Anregung im Fahrzeug [SSN+06]. Geprüft werden konnte aber zusätzlich die Bedeutsamkeit der Reaktion in der Lenkung, die aus Studien im Fahrsimulator als bester Schätzer abgeleitet wurde.

Aus dem Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Realfahrzeugstudien mit einer Studie im Fahrsimulator ohne Bewegungsrückmeldung ergibt sich die Dominanz der kinästhetischen Rückmeldung. Zwar ermöglicht der visuelle Kanal auch ohne Bewegungsrückmeldung eine Bewertung in ähnlicher Art und Weise. Für eine in Niveau und Verlauf angemessene Betrachtung ist die Darstellung der Fahrzeugbewegung jedoch unabdingbar. Der haptische Kanal tritt in den Hintergrund, da hier als wesentlich identifizierte Größen nicht haptisch vermittelt werden.

6.2.2 Reaktionszeit des Fahrers

Als weitere Eigenschaft des Fahrers wird über seine Reaktionszeit die Totzeit dieses Regelgliedes beschrieben. Betrachtet werden Sprünge im Lenkmoment und gleichzeitig Zusatzlenkmomente mit begrenzten Anstiegssteilheiten im Sinne einer Folgeregelung. Bei Sprunganregung zeigt sich, dass die Reaktionszeit des Fahrers gegen 220ms konvergiert. Diese Zeit ist

dabei als konservativer Schätzer anzusehen. So bezeichnet der extrahierte Reaktionszeitpunkt den Zeitpunkt zu dem der Fahrer bereits die Lenkradbewegung vollständig aufgehalten hat. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies das Resultat einer etwas früher beginnenden motorischen Aktion des Fahrers ist. Darüber hinaus gelten die 220ms ab Anforderung des Zusatzmomentes. Die Verzugszeit bis zur Umsetzung dieser Anforderung in der Lenkung ist nicht berücksichtigt.

Der Fahrer kann auf haptische Reize, bei denen Reiz- und Reaktionsallokation übereinstimmen, deutlich schneller antworten, als die vielfach angenommene „Schrecksekunde“ des Fahrers vermuten lässt. Daher sollten Reaktionszeiten in der Größenordnung einer Sekunde als Motivation verstanden werden, dem Fahrer ein geeigneteres Konzept zur Verfügung zu stellen. So sollten Signale z.B. nicht einfach warnen, sondern, sofern möglich, direkte Handlungsanweisungen enthalten. Damit wird der Fahrer bei der Handlungsauswahl entlastet und eine schnellere Verarbeitung ermöglicht.

Aus der Literatur sind Wahrnehmungsschwellen des Fahrers bei sprungförmig aufgeschalteten Lenkmomenten im Bereich von 0.8Nm (75% Schwelle) bekannt. In den hier durchgeführten Studien zeigt sich, dass der Einfluss der Amplitude bei eben solchen Zusatzmomenten verschwindet, die innerhalb der Totzeit des Fahrers zu Veränderungen unterhalb dieser Wahrnehmungsschwelle führen. Langsam eingerampte Zusatzmomente sind in diesem Fall für den Fahrer unabhängig von ihrer Amplitude stets beherrschbar. Zumindest zeigt sich das für die hier untersuchten Amplitudenbereiche.

6.3 Evaluation der Controllability von eingreifender Fahrerassistenz

In dieser Arbeit ist dargelegt worden, dass für Prüfung der Controllability von Fahrerassistenzsystemen über die im Code of Practice vorgeschlagene Testung von naiven Versuchspersonen eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind: Insbesondere sind hier die Auswahl des/der Fahrmanöver, der zu untersuchenden Stichproben und fahrzeugseitigen Zustandsgrößen wie z.B. der Geschwindigkeit zu nennen. Ziel dieser Arbeit ist dabei nicht die Bewertung der Controllability einer konkreten Systemauslegung, sondern die prinzipielle Darstellung einer Vorgehensweise unter Berücksichtigung des RESPONSE Code of Practice.

6.3.1 Identifikation von Prüfsituationen

Ziel ist es, Fahrmanöver zu identifizieren, die einerseits sensitiv sind und den Übergang von sicher kontrollierbaren Eingriffen zu nicht mehr beherrschbaren Systemeingriffen abbilden können. Weiter sind solche Fahrmanöver zu identifizieren, die die Bandbreite, der im realen Straßenverkehr auftretenden Situationen möglichst vollständig abdecken. Dazu sind sowohl straßenbauliche Richtlinien heranzuziehen als auch die Leistungsbereiche eines normalen Fahrers zu berücksichtigen.

Aufgrund des Einsatzbereichs eines Spurführungssystems (Autobahnen und Magistralen außerhalb geschlossener Ortschaften) konnte auf die Betrachtung von komplexen Szenarien

im Bereich niedriger Geschwindigkeiten wie z.B. Kreuzungen verzichtet werden. Aus Vorüberlegungen und Vorversuchen wurde die Aufschaltung von Zusatzmomenten bei Geradeausfahrt, Kurvenfahrt und während eines Spurwechsels als wesentlich identifiziert. Die Geradeausfahrt wurde ausgehend von straßenbaulichen Richtlinien durch eine Pylonengasse mit 2.5m Breite weiter verschärft. Diese Engstelle ist als worst-case Szenario der Geradeausfahrt im normalen Straßenverkehr anzusehen. Über den Vergleich der Störungsauswirkungen zwischen den Manövern konnte die Engstelle als sensitivstes Fahrmanöver identifiziert werden, bei dem gleiche applizierte Zusatzmomente stets als schwerwiegender bewertet wurden als in den weiteren betrachteten Fahrmanövern.

Für weitere Untersuchungen der Auswirkungen von Zusatzmomenten im ähnlichen Kontext erscheint es aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit als notwendig und hinreichend, allein die Fahrsituation Engstelle zu wählen. Die Beschränkung der Breite erhöht einerseits die Schwierigkeit gegenüber einer freien Geradeausfahrt und bietet dem Fahrer gleichzeitig eine klare Referenz für die Bewertung seiner Leistung. Der stationäre Zustand des Fahrzeugs in diesem Fahrmanöver sorgt für ein geringes Grundrauschen und hilft bei Wahrnehmung und Bewertung.

6.3.2 Zur Messbarkeit der Kontrollierbarkeit

Ziel war es, in so ausgewählten Fahrszenarien Kriterien für ein erfolgreiches Absolvieren zu definieren. Zur Bewertung werden die in Kapitel 3 beschriebenen Maße herangezogen. Dies sind insbesondere die Maße der Aufgabenbewältigung (z.B. Spurverletzungen), Fahrer- und resultierende Fahrzeugreaktionen und die subjektive Bewertung der Eingriffsepisode durch den Fahrer. Besonders hervorzuheben ist die Bewertung der Kontrollierbarkeit auf unterschiedlichen Ebenen: Neben Leistungsmaßen des Fahrer-Fahrzeug-Systems steht insbesondere die Bewertung durch den Fahrer im Zentrum der Betrachtung.

In einem solchen Versuchsdesign gilt es nach Vorgaben des Code of Practice, mindestens 20 Fahrer zu prüfen, die alle das Manöver bei gleichzeitiger Aufschaltung des zu betrachtenden Lenkeingriffes erfolgreich absolvieren. Die Situation ist mindestens dreifach wiederholt darzubieten. Dies unterstreicht die notwendige hohe Standardisierung des Versuchsaufbaus.

Für die vorliegende Arbeit ist einschränkend anzumerken, dass innerhalb der ersten Studie mit 18 Probanden die Vorgabe aus RESPONSE nicht erfüllt wurde. In den vorliegenden Untersuchungen steht die Analyse der Wirkzusammenhänge von Zusatzlenkmomenten im Vordergrund. Die Darstellung eines methodisches Vorgehens zur Absicherung von Fahrerassistenzsystemen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft trotz dieser Abweichung.

6.3.3 Das Dilemma potentiell schwächerer Fahrergruppen

Aus dem Code of Practice ergibt sich die Forderung nach der Berücksichtigung potentiell schwächerer Subpopulationen. Für die Identifikation einer möglichen Subpopulation sind insbesondere Unfallanalysen ein wichtiges Werkzeug. Gleichzeitig ist zu analysieren, welche speziellen Forderungen das zu testende Assistenzsystem an einen Fahrer stellt. Sofern diese Anforderungen von den normalen Anforderungen zum Führen eines Kraftfahrzeugs abwei-

chen, lassen sich so Fahrergruppen mit Defiziten hinsichtlich dieser Ansprüche identifizieren. Diese wären dann besonders zu berücksichtigen.

Als problematisch ist dabei anzusehen, dass insbesondere Fahrer mit besonderen Schwierigkeiten beim Autofahren kaum für die Teilnahme an einer Studie im Realfahrzeug zu gewinnen sind. Die Probanden werden auf freiwilliger Basis angeworben und daher ist davon auszugehen, dass es sich eher um Personen handelt, die Spaß am Autofahren haben. Dies zeigen auch die hohen mittleren Fahrleistungen der Versuchsteilnehmer. Gerade solche Fahrer, die im Straßenverkehr vermehrt Problemen begegnen, werden sich kaum freiwillig zu einer Fahrstudie zur Verfügung stellen. Diese Annahme lässt vermuten, dass die Leistungsfähigkeit einer solchen Stichprobe das Leistungsvermögen der entsprechenden Grundgesamtheit eher überschätzt.

Damit stellt die Rekrutierung von potentiell schwächeren Fahrern ein Dilemma dar, das kaum ohne weiteres lösbar erscheint. Hinsichtlich der hier untersuchten Stichprobe der älteren Fahrer bleibt offen, wie die Auswahl von Probanden so geleistet werden kann, dass eine repräsentative Stichprobe zur Teilnahme an Fahrversuchen motiviert werden kann. Es sind dringend Ansätze notwendig, die hierzu eine Lösung anbieten.

6.3.4 Fazit zur Testmethodik der Evaluation der Kontrollierbarkeit

Über den hier beschriebenen Versuchsaufbau ist es möglich, die Kontrollierbarkeit von Lenkeingriffen zu prüfen und zu beschreiben. Damit lehnt sich diese Arbeit an die Vorgaben aus dem Code of Practice und beschreibt ein konkretes Vorgehen zur Testung der Kontrollierbarkeit von Fahrerassistenzsystemen mit Lenkungseingriffen bei Geschwindigkeiten oberhalb von 70km/h. Dazu galt es, Kriterien zu definieren, die eine Bewertung überhaupt ermöglichen. Was ist für den Fahrer kontrollierbar und wie kann Kontrollierbarkeit im Fahrversuch gemessen werden? Neben dem Verlassen der Fahrspur sind hier deutlich engere und sensitivere Kriterien gewählt worden, die eine Bestimmung der Kontrollierbarkeit auf mehreren Ebenen ermöglichen. Im Speziellen wurden weiterhin Prüfsituationen entwickelt und bewertet, die eine sinnvolle Bewertung der Kontrollierbarkeit ermöglichen. Ein Ziel bei Gestaltung und Auswahl der Prüfsituationen ist dabei die möglichst vollständige Abdeckung der im realen Straßenverkehr auftretenden relevanten Situationen. Weiterhin wurde den Vorgaben aus RESPONSE Rechnung getragen und potentiell schwächere Fahrergruppen berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die untersuchten älteren als auch die jüngeren Fahrer in der gestellten Fahraufgabe die gleiche Leistung zeigten wie die Teilnehmer mittleren Alters. Über die Darlegung der Entwicklung des Testdesigns, der Kriterien für Kontrollierbarkeit und der auszuwählenden Stichprobe liefert diese Arbeit einen Beitrag für das methodische Vorgehen in künftigen Untersuchungen.

6.4 Weiterer Forschungsbedarf

Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen und gesammelten Erfahrungen bei der Durchführung der empirischen Untersuchungen in diesem Kontext ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Für eine Erweiterung des Gültigkeitsbereiches der Aussagen ist neben einer Replikati-

on insbesondere eine Erweiterung auf andere Fahrszenarien zu fordern. Im Vordergrund stehen komplexere Fahrmanöver (Kreuzung, Abbiegen mit dynamischen Merkmalen), die aufgrund der Zielanwendung Spurführungssystem hier nicht im Fokus standen. Auf Seiten der Signalparameter ist als spezieller Fall auch ein Zusatzmoment mit Sprung im Vorzeichen der Amplitude zu berücksichtigen. Es gilt in diesem Zusammenhang zu klären, ob der Betrag der Amplitude allein von Bedeutung ist oder dieser durch die Ausgangslage der Amplitude variiert. So ist bislang noch nicht geklärt, ob ein Wechsel aus der Ausgangslage 0 genauso zu bewerten ist, wie ein betragsmäßig gleicher Wechsel mit Vorzeichenwechsel von einem Ausganglenkmoment. Die bisherigen Ergebnisse hier, insbesondere bei Kurvenfahrt und Aufschaltung nach Kurveninnen vs. Kurvenaußen lassen demgegenüber den Schluss zu, dass eine Aufschaltung eines Lenkmoments aus der Ausgangslage 0 einer Abschaltung des Lenkmoments A in die Ausgangslage 0 entspricht.

Die in dieser Arbeit geleisteten ersten Schritte zur Ermittlung fahrzeugübergreifender Grenzwerte über den Vergleich der durch die Lenkmomente ausgelösten Fahrzeugreaktionen sind in weiteren Schritten zu präzisieren und insbesondere in unterschiedlichen Fahrzeugmodellen zu prüfen. In dem vorliegenden Ansatz wurde der Lenkungsstrang variiert, ohne das weitere Übertragungsverhalten des Fahrzeugs zu verändern. In einem weiteren Schritt könnte ein Fahrzeug mit gleicher Lenkungsabstimmung aber veränderter querdynamischer Reaktion wesentliche Erkenntnisse liefern. In der Regel ist der Aufwand für einen solchen technischen Aufbau als sehr hoch anzusehen. Es ist zu diskutieren, ob alternativ über eine extreme Veränderung der Sitzposition des Fahrers hinsichtlich der Gierachse des Fahrzeugs diese Anforderung bereits ausreichend erfüllt werden könnte.

In weiteren Schritten ist denkbar, die ermittelten Wahrnehmungszusammenhänge präziser aufzulösen. Zur besseren Kontrolle der Sekundärvarianz ist es möglich, die dynamischen Zusammenhänge im Fahrzeug aufzuspalten und so die jeweiligen Bewegungsgrößen isoliert zu betrachten. Ein Ansatz dazu wird in [SSN+06] beschrieben. Denkbar ist dies auch über einen Fahrsimulator mit Bewegungssystem. Zu beachten sind dabei strenge Vorgaben hinsichtlich der einzuhaltenden Zeitverzögerungen vor allem zwischen haptischer und kinästhetischer Rückmeldung.

Die hier gelieferten Ergebnisse zu der wesentlichen Führungsgröße der Fahrerwahrnehmung leiden unter der Einschränkung, dass hier lediglich ein Ansatz mit einer einzelnen Eingangsgröße betrachtet wird. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Fahrer nicht ausschließlich auf eine Bewegungsgröße reagiert, sondern multiple Eingangsgrößen gleichzeitig berücksichtigt. Damit ist ein multifaktorieller Ansatz zu fordern. Denkbar erscheint der Einsatz eines Bayesschen Netzes [Nea03], das die hohen Interkorrelationen der Zustandsgrößen im Fahrzeug berücksichtigt.

Auch hinsichtlich der hier extrahierten Kennwerte sind Weiterentwicklungen denkbar. Zwar haben sich die gewählten Kennwerte als gut geeignet erwiesen. Zugleich unterliegen sie auch Einschränkungen und sind lediglich als Schätzer zu verstehen. So bildet keiner der hier betrachteten Kennwerte beispielsweise den schwachen Anstieg im Urteil bei Zusatzmomenten geringster Anstiegssteilheit ab. Zwar wurden in den Auswertungen zwischenzeitlich auch Effektivwerte betrachtet, allerdings konnten auch diese keine befriedigende Verbesserung erzielen. Dennoch bleibt eine Berücksichtigung des Verlaufs des Moments vielversprechend

und sollte den bisherigen Betrachtungen der maximalen Auswirkungen an die Seite gestellt werden.

6.5 Anwendungen im Fahrzeug und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wie es möglich ist, Eingriffe in die Lenkung eines Fahrzeugs über die Aufschaltung zusätzlicher Lenkmomente so zu gestalten, dass sie für den Fahrer jederzeit übersteuerbar und kontrollierbar bleiben. Es werden Empfehlungen ausgesprochen, die für das Design solcher Signale auch in anderen Kontexten als der hier fokussierten Anwendung für die Unterstützung des Fahrers im Rahmen eines Spurführungssystems nutzbar sind. Zu nennen sind hier insbesondere Systeme zur Stabilisierung des Fahrzeugs wie z.B. einer Giermomentenkompensation über Lenkungseingriffe. Ein denkbare Anwendungsfeld sind weiterhin solche Assistenzsysteme, die den Fahrer nicht nur bei der Spurhaltung unterstützen, sondern ihm Empfehlungen für eine zu wählende Trajektorie liefern. Denkbar ist beispielsweise ein System zur Unterstützung des Spurwechsels, bei dem der Fahrer über zusätzliche Lenkmomente Rückmeldung über einen idealen Ablauf des Spurwechsels erhält. Auch bei der Routenwahl und zur Hilfe bei der Navigation im unübersichtlichen Verkehr, der ein Blick auf ein Navigationssystem erschwert, können solche Signale eingesetzt werden. Aus den Erfahrungen dieser Arbeit ergibt sich ebenso die Unterstützung bei Initiierung und Ausführung von Ausweichmanövern. Auch wenn solche Systeme hohe Anforderungen an die Sensorik und die Klassifikation der Umgebung voraussetzen, erscheint eine Umsetzung mit Hilfe gerichteter Lenkmomente zumindest prüfenswert.

Hinzuweisen ist an dieser Stelle auch auf Arbeiten, die im Gegensatz zum Geltungsbereich der vorliegenden Arbeit reflexartige Antworten betrachten [EKE08]. Während hier ausschließlich bewusste und damit kontrollierbare perzeptive und motorische Prozesse berücksichtigt werden, ist eine Erhöhung der Leistung durch die Nutzung schneller automatisierter Antworten wie z.B. Reflexhandlungen zumindest theoretisch denkbar. Allerdings erscheint eine Anwendung im Fahrzeug eben aufgrund der schwierig zu kalkulierbaren Auswirkungen solcher hochgradig verknüpften Reiz-Reaktions-Mechanismen noch nicht absehbar.

Im Besonderen liefert diese Arbeit eine methodische Umsetzung zur Untersuchung von Lenkungseingriffen und den Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System mit Normalfahrern. Dabei finden insbesondere Vorgaben aus dem RESPONSE Code of Practice Eingang in das Verfahren. Neben diesen methodischen Vorschlägen und den Gestaltungsempfehlungen liefert diese Arbeit einen weiteren Baustein zum Verständnis der Wahrnehmungs- und Reaktionszusammenhänge des Fahrers bei fahrdynamischen Anregungen. So bleibt das Ziel bestehen, eines Tages den Menschen und damit auch den Fahrer vollständig in seiner Handlungsweise zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- [AMN92] Arkenbosch, M., Mom, G., & Nieuwland, J. (1992). *Das Auto und sein Fahrwerk* (Vol. 1). Stuttgart: Motorbuch Verlag.
- [AZ94] Amelang, M. & Zielinski, W. (1994). *Psychologische Diagnostik und Intervention*. Berlin: Springer-Verlag.
- [Bac00] Bachmann, V. (2000). *Berechnung des Radrückstellmomentes zur Erzeugung des Lenkgefühls bei einem Steer-by-wire Fahrzeug*. In VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12 (Vol. 437, pp. 92-112). Düsseldorf: VDI Verlag.
- [Bat99] Batavia, P. (1999). *Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems*. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.
- [BBT72] Barbenza, C. M. d., Bryan, M. E., & Tempest, W. (1972). *Individual loudness functions*. Journal of Sound and Vibration, 11, 399-410.
- [Bie98] Bielaczek, C. (1998). *Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr*. Paper presented at the fifteenth international technical conference on the enhanced safety of vehicles, Melbourne.
- [BG02] Boyce, T. E. & Geller, E. S. (2002). *An instrumented vehicle assessment of problem behaviour and driving style: Do younger males really take more Risk?* Accident Analysis and Prevention, 34 (1), 51-64.
- [BK02] Buld, S., & Krüger, H. P. (2002). *Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit (EMPHASIS)*. Würzburg: Uni Würzburg.
- [BKH*02] Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., & Totzke, I. (2003). *Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. In VDI-Gesellschaft (Ed.), *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten* (Nr. 1745 ed.). Düsseldorf.
- [Bra71] Braess, H.-H. (1971). *Theoretische Untersuchung des Lenkverhaltens von Kraftfahrzeugen*. TU München.
- [BS03] Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (2003). *Biologische Psychologie* (5. ed.). Berlin: Springer.
- [Bub77] Bubbs, H. (1977). *Ergonomie des Mensch-Maschine-Systems*. TU München, München.
- [Bub01] Bubbs, H. (2001). *Haptik in Kraftfahrzeugen*. In K. P. Timpe (Ed.), *Kraftfahrzeugführung* (pp. 155-175). Berlin: Springer.
- [Bus03] Buschardt, B. (2003). *Synthetische Lenkmomente* (Vol. 22). Düsseldorf: VDI Verlag.

- [Cit04] Citroen (2004). AFIL - *Alert de franchissement involontaire de ligne*. <http://www.citroen.de/CWG/Unternehmen/Innovationen/AFIL/> (Link vom 09.04.2008:)
- [CZW+92] Chira-Chavala, T., Zhang, W. B., Walker, J., Javandel, F., & Demsetz, L. (1992). *Feasibility Study of Advanced Technology HOV Systems - Vol. 4 Implementation of Lateral Control Systems in Transitways* (No. UCB-ITS-PRR-92-6). Berkeley, CA: Institute of Transportation Studies.
- [CZC+02] Chunyan, W., Zuo, L., Chaozhong, W., Fengtian, C., & Xiaojing, W. (2002, 06.2002). *Design & Implementation of Control System for Lane Following*, 2003, from <http://www.itsc.com.cn/pdf/wcy/w1.pdf>
- [Dai00a] Daimler-Chrysler. (2000a). *Rettendes Rattern*. Hightech Report 2000, 84-85.
- [Dai00b] Daimler-Chrysler (2000b). *Telligent-Spurassistent*. Link vom 9.4.2008. http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/trucks/home/products/new_trucks/actros/cabs/features/fittings_for__security.0002.0001.html
- [DBT+08] Deborne, R., Barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A. (2008). *Simulation study of driver stress and performance to an unexpected steering critical event*. Paper presented at DSC EUROPE 2008, Monaco, 31 January – 01 February
- [Don82] Donges, E. (1982). *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil-Industrie, 2/82, 183-192.
- [EFN+08] El Jaafari, M., Forzy, J.-F., Navarro, J., Mars, F. & Hoc, J.-M. (2008) *User Acceptance and Effectiveness of Warning and Motor Priming Assistance Devices in Car Driving*. Proceedings of the HUMANIST European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transportation Systems, Lyon, 3.-4. April 2008
- [EKE08] Ehrenpfordt, I., Kullack, A., Eggert, F. (2008). *ReflektAS – Usage of reflexive driver reactions in ADAS-development*. Proceedings of the HUMANIST European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transportation Systems, Lyon, 3.-4. April 2008
- [Enk01] Enkelmann, W. (2001). *Video-Based Driver Assistance - From Basic Functions to Applications*. International Journal of Computer Vision, 45(3), 201-221.
- [FG55] French, T., & Gough, V. E. (1955). *Die Rolle des Reifens in Konstruktion und Betriebsverhalten des Kraftwagens*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 57(4), 91-99.
- [FS53] Fitts, P.M. & Seeger, G.M. (1953). *S-R Compatibility: Spatial Characteristics of Stimulus and Response Codes*. Journal of Experimental Psychology, 46, 199-210
- [FSS02] Furusho, H., Shirato, R., & Shimakage, M. (2002, 06.2002). *A Lane Recognition Method Using the Tangent Vectors of White Lane Markers*. Retrieved

- 30.09.2003, 2003, from <http://www.s2.chalmers.se/research/cal/automotive/IPC/IPCPublic/Publication/AVEC/AVEC02/Session/Paper/026.pdf>
- [FWH77] Frank, J. S., Williams, I. D., & Hayes, K. C. (1977). *The ischemic nerve block and skilled movement*. Journal of Motor Behavior, 9, 217-224.
- [Ges97] Gescheider, G. A. (1997). *Psychophysics: The Fundamentals* (3 ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- [Gil92] Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE, Warrendale, PA.
- [Gil04] Gillespie, R. B. (2004). *Haptic interface to virtual environments*. In Kurfess, T. (Ed.), CRC Handbook on Robotics and Automation. CRC Press.
- [God84] Godthelp, H. (1984). *Studies on human vehicle control*. Soesterberg, Netherlands: Institut für Perception, TNO.
- [GMB84] Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). *The development of a time-related measure to describe driving strategy*. Human Factors, 26(3), 257-268.
- [God85] Godthelp, H. (1985). *Precognitive Control: open and closed-loop steering in lane-change manoeuvre*. Ergonomics, 28(10), 1419-1438.
- [Gre66] Green, D. M. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York: John Wiley & Sons.
- [Gru05] Gründl, M. (2005). *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Universität Regensburg, 2005.
- [GSN*05] Gradenegger, B., Schmidt, G., Neukum, A., Scholz, S. und Krüger, H.-P. (2005). *Haptische Warnsignale im Fahrzeug: Vermittlung von Information durch diskrete Lenkmomente Realisierung und Akzeptanz von eingreifenden Querführungs-Systemen*. Unveröffentlichter Bericht, Würzburg: WIVW.
- [Hac98] Hacker, W. (1998). *Allgemeine Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Bern: Huber.
- [HB03] Hoc, J.M., & Blosseville, J.M. (2003). *Cooperation between drivers and in-car automatic driving assistance*. In G.C. van der Veer & J.F. Hoorn (Eds.), Proceedings of CSAPC'03 (pp. 17-22). Rocquencourt, France: EACE.
- [Hel85] Heller, O. (1985). *Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU)*. Psychologische Beiträge, 27, 478-493.
- [HSF06] Harrer, M., Schmitt, T., Fleck, R. (2006). *Elektromechanische Lenksysteme - Herausforderungen und Entwicklungstrends*. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [HT00] Hargutt, V., & Tietze, H. (2000). *Einschlafen am Steuer: Erkennung und Gegenmaßnahmen*. Blick, 2, 91-93.

- [HUK94] HUK-Verband (1994) (Hrsg.). *Fahrzeugsicherheit 90. Analyse von Pkw-Unfällen. Grundlagen für künftige Forschungsarbeiten*. München: HUK-Verband.
- [IAI+98] Ikegaya, M., Asanuma, N., Ishida, S., & Kondo, S. (1998, 14.-18.Sept.1998). *Development of a lane following assistance system*. Paper presented at the International symposium on advanced vehicle control AVEC '98, Nagoya, Japan.
- [ISO99] ISO 3888-1 (1999). *Personenkraftwagen - Prüfgasse für den Spurwechseltest Teil 1: Doppelter Fahrspurwechsel*. Beuth Verlag.
- [ITK+00] Ishida, S., Tanaka, J., Kondo, S., & Kawagoe, H. (2000). *Evaluation of Driver Assistance System*. Paper presented at the 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems ITS, Turin.
- [Jun90] Junker, H. (1990). *Moderne Lenkungstechnologie - Von den Anforderungen zur technischen Realisierung*. Automobil-Industrie, 4/90, 379-389.
- [KBK00] Kaussner, A., Buld, S., & Krüger, H.-P. (2000). *Meilensteinbericht: Bereitstellung verschiedener Assistenzsysteme in der Simulation*. Unveröffentlichter EMPHASIS-Bericht. Würzburg: Universität Würzburg.
- [KNS99] Krüger, H.-P., Neukum, A., & Schuller, J. (1999). *Bewertung von Fahrzeugeigenschaften - vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl*. Paper presented at the 3. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme: Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen, 06.-08.Oktober 1999, Berlin.
- [KPB+06] Kozak, K., Pohl, J., Birk, W., Greenberg, J., Artz, B., Blommer, M., Cathey, L., Curry, R. (2006). *Evaluation of Lane Departure Warnings for Drowsy Drivers*. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting 2006
- [KWM02] König, W., Weiß, K.-E., & Mayser, C. (2002). *SANTOS. Situations-Angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung - Projektabschlussbericht der Robert Bosch GmbH und der BMW Group BMBF 19 5 98 26A/B*. Bonn: BMBF.
- [Kru00] Krüger, H. P. (2000, 4.-6. Oktober, 2000). *Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen - Zur Humanisierung der Mensch-Maschine-Kommunikation*. Paper presented at the 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen.
- [KVT01] Krüger, H.-P., Vollrath, M., & Totzke, I. (2001). *Abschlussbericht: Integration von Kommunikation und Assistenz*. Würzburg: Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW).
- [LC95] Lemarchand, C., & Coffin, F. (1995). *Conception Method of Man Machine Interface for an Automotive Vehicle Transversal Driving Assistance System*. Paper presented at the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems.

- [Lee02] Lee, J. W. (2002). *A Machine Vision System for Lane-Departure Detection*. Computer Vision and Image Understanding, 86, 52-78.
- [LGL95] Lin, C.-F., Galip Ulsoy, A., & LeBlanc, D. J. (1995). *Lane Geometry Reconstruction: Least Square Curve Fit Versus Kalman Filter*. Paper presented at the International Mechanical Engineering Conference and Exhibition, San Francisco, CA.
- [LJV+96] LeBlanc, D. J., Johnson, G. E., Venhovens, P. J. H., Gerber, G., DeSonia, R., Ervin, R. D., et al. (1996). *CAPC: A Road-Departure Prevention System*. IEEE Control Systems, 16(6), 61-71.
- [LK05] Leffler, H., Köhn, P. (2005). *Fahrdynamikregelung mit vernetztem Brems- und Lenkeingriff: Funktions- und Sicherheitspotentiale*. Proceedings of VDA Technischer Kongress 2005, 165-177.
- [LP95] Lu, C.-H. & Proctor, R.W. (1995). *The Influence of Irrelevant Location Information on Performance: A Review of the Simon and Spatial Stroop Effects*. Psychonomic Bulletin & Review, 2 (2), 174-207
- [Maa99] Maag, C. (1999). *Fahrerzustandsabhängige Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Würzburg, Würzburg.
- [MAN02] MAN (2002). *Lane Guard System*. Link vom 09.04.2008. [http://www.man-mn.com/de/innovationundkompetenz/Sicherheit/Spurverlassenswarner___\(LG S\).jsp](http://www.man-mn.com/de/innovationundkompetenz/Sicherheit/Spurverlassenswarner___(LG%20S).jsp)
- [Mar01a] Marstaller, R. (2001a). *Fahrerverhaltensänderungen bei der fahrerassistierenden Kfz-Steuerung mit aktiven Bedienelementen gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept*. In VDI-Berichte 1613 (pp. 297-313). Düsseldorf: VDI Verlag.
- [Mar01b] Marstaller, R. (2001b). *SANTOS-Meilensteinbericht Arbeitsphase 5 "Erprobung" - Evaluation von SC und HC*. München: Technische Universität München - Lehrstuhl für Ergonomie.
- [Mar01c] Marstaller, R. (2001c). *SANTOS-Meilensteinbericht Arbeitsphase 5 "Erprobung" - Versuche zu HC-Randwarnungen*. München: Technische Universität München - Lehrstuhl für Ergonomie.
- [MAU00] Maurer, M. (2000). *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Dissertation Universität der Bundeswehr, München.
- [MEH96] Mehring, S., Frank, U., & Suissa, A. (1996). *Optische Spurhaltung - Eine Unterstützung des Fahrers bei der Lenkaufgabe*. Automatisierungstechnik, 44(5), 238-242.
- [MAK+82] Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Smith, J. E. K. (1982). *Models for the speed and accuracy of aimed movements*. Psychological Review, 89, 449-482.
- [MGP60] Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K.-H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.

- [MP04] Mann, M. & Popken, M. (2004). *Auslegung einer fahreroptimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Querführungsassistenten*. Beitrag auf dem 5. Braunschweiger Symposium Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel, Braunschweig, 17.-18.02.2004
- [Mue07a] Müller, T. (2007). *Fahrerassistenz auf dem Weg zur automatisierten Fahrzeugführung – Teil 1: Regelungsaufgabe, Rolle des Fahrers und Lösungsansätze*. ATZ 01/07, 58-64.
- [Mue07b] Müller, T. (2007). *Fahrerassistenz auf dem Weg zur automatisierten Fahrzeugführung – Teil 2: Situationswahrnehmung, Handlungsregulation und Fortbewegung*. ATZ 02/07, 170-175.
- [Mue93] Müller-Limroth, W. (1993). *Sinnesorgane*. In H. Schmidtke (Ed.), *Ergonomie* (3. ed.). München: Carl Hanser.
- [Mut01] Mutschler, H. (2001). *Technical report: Warning systems in vehicles*, Karlsruhe.
- [Naa92] Naab. (1992). *Heading Control - Ein Fahrerassistenzsystem zur Spurhaltung*. EW-11-Naab.
- [Naa98] Naab, K. (1998). *Heading Control - Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung*. Paper presented at the Fahrerassistenzsysteme, Haus der Technik, Essen, 16/17.11.1998
- [Nea03] Neapolitan, R.E. (2003). *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall
- [Neu01] Neukum, A. (2001). *Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop - Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes*. In K. Becker (Ed.), *Subjektive Fahrindrücke sichtbar machen. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und Komponenten* (Vol. 12, pp. 1-20). Renningen: expert.
- [NHT05] NHTSA (2005). *Fatality Analysis Reporting System General Estimates System 2005 DATA SUMMARY*, National Highway Traffic Safety Administration, <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/TSF05DATASUMMARY.PDF>, Feb. 2007.
- [NK03] Neukum, A. und Krüger, H.-P. (2003). *Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien*. VDI-Berichte, Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, 1791, S. 297–318.
- [NKS01] Neukum, A., Krüger, H.-P., & Schuller, J. (2001). *Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?* VDI-Berichte, 1613, 13-32.
- [Odo86] O'Donnell, R.D. & Eggemeier, F.T. (1986). *Workload assessment methodology*. In K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (eds.), *Handbook of Human Performance*, Vol. 2, Cognitive Processes and Performance (S. 42/1-42/9). Chichester: Wiley.
- [Pai71] Paivio, A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. New York: Holt, Rinehart & Winston.

- [Pai86] Paivio, A. (1986). *Mental Representations: A Dual Coding Approach*. New York: Oxford University Press.
- [PB78] Polit, A., & Bizzi, E. (1978). *Processes controlling arm movements in monkeys*. Science, 201, 1235-1237.
- [PC07] Pick, A. J. & Cole, D. J. (2007) *Driver steering and muscle activity during a lane-change manoeuvre*. Vehicle System Dynamics, Vol. 45 (9), 781-805
- [PG03] Pilutti, T., & Galip Ulsoy, A. (2003). *Fuzzy-Logic-Based Virtual Rumble Strip for Road Departure Warning Systems*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 4(1), 1-12.
- [PE03] Pohl, J., & Ekmark, J. (2003). *Development of a haptic intervention system for unintended lane departure*. SAE Technical Papers, 2003-01-0282.
- [PJ96] Pomerleau, D. & Jochem, T. (1996): *Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering*. IEEE Expert, 11(2), 19-27.
- [Pou74] Poulton, E. C. (1974). *Tracking Skill and Manual Control*. New York: Academic Press.
- [Pom95] Pomerleau, D. (1995). *RALPH: Rapidly adaptive lateral position handler*. Paper presented at the IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Detroit, MI.
- [PRE06] PReVENT (2006). *RESPONSE 3 - Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS*. Link vom 09.07.2007: http://prevent-ip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3_CoP_v3.0.pdf
- [Ras83] Rasmussen, J. (1983). *Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13(3), 257-266.
- [RBL02] Rosenzweig, M. R., Breedlove, S. M., & Leiman, A. L. (2002). *Biological psychology* (3rd ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- [Rei88] Reimpell, J. (1988). *Fahrwerktechnik: Grundlagen* (2. ed.). Würzburg: Vogel Verlag.
- [Rei98] Reichart, G. (1998). *Fahrerassistenz - Ein Konzept zur Erhöhung der menschlichen Zuverlässigkeit im Straßenverkehr*. VDI Berichte, 1448, 79-98.
- [Rei07] Reichel, M. (2007). *Comparative Assessment of Lanekeeping Assistance Algorithms and Their Adaptation to the Driver's Inattention*. Diplomarbeit an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Unveröffentlicht.
- [RS88] Reimpell, J., & Sponagel, P. (1988). *Fahrwerktechnik: Reifen und Räder*. Würzburg: Vogel Verlag.
- [RSA07] RSA (2007). *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen – RSA*. Link vom 09.07.2007: http://www.stvzo.de/seminare/rsa/RSA_Inhalt.htm

- [RSG04] Rossetter, E.J., Switkes, J.P., & Gerdes, J.C. (2004). *Experimental Validation of the Potential Field Driver Assistance System*. International Journal of Automotive Technology, v5, no. 2, 95-108.
- [Rue93] Rühmann, H. (1993). *Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen*. In H. Schmidtke (Ed.), *Ergonomie* (3. ed., pp. 554-562). München: Carl Hanser.
- [Sch88] Schmidt, R. A. (1988). *Motor Control and Learning*. Champaign, IL: Human Kinetics Books.
- [Sch93a] Schlag, B. (1993). *Elderly Drivers in Germany – Fitness and Driving Behavior*. Accident Analysis and Prevention, 25.
- [Sch93b] Schmidtke, H. (1993). *Ergonomie* (3rd ed.). München: Hanser.
- [Sch94] Schumann, J. (1994). *On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control - The steering wheel as an active control device*. Münster: Waxmann Verlag.
- [Sch03] Schandry, R. (2003). *Biologische Psychologie*. Weinheim: Beltz, Psychologie Verlags-Union.
- [Sch07] Schmidt, G. (2007). *Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug*. Beitrag auf der 4. Tagung der VDI-Gesellschaft Fahrer im 21. Jahrhundert - HMI und Innenraum. 14.-15.11.2007, Braunschweig.
- [Sch08] Schmidt, G. (2008). *Applying the RESPONSE Code of Practice for Evaluation of driver assistance systems: driver age and perception of steering torque signals*. IET Intelligent Transport Systems Vol 2, No. 4, December 2008
- [SDH+91] Schladover, S., Desoer, C., Hedrick, K. J., Tomizuka, M., Walrand, J., Zhang, W.-B., et al. (1991). *Automated Vehicle Control developments in the PATH Program*. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 01(40), 114-120.
- [SGF+93] Schumann, J., Godthelp, H., Farber, B., & Wontorra, H. (1993). *Breaking up Open-Loop Steering Control Actions - The Steering Wheel as an Active Control Device*. Vision in Vehicles IV, 321-332.
- [SGH92] Schumann, J., Godthelp, J., & Hoekstra, W. (1992). *An exploratory simulator study on the use of active control devices in car driving*. In TNO-Report AD-A256 562, IZF 1992 B-2. Soesterberg, Netherlands: TNO Inst. for Perception.
- [SGK+98] Sato, K., Goto, T., Kubota, Y., Amano, Y., & Fukui, K. (1998, 14.-18.Sept. 1998). *A Study on a Lane Departure Warning System Using a Steering Torque as a Warning Signal*. Paper presented at the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '98, Nagoya, Japan.
- [Sha77] Shapiro, D. C. (1977). *A preliminary attempt to determine the duration of a motor program*. In R. W. Christina (Ed.), *Psychology of motor behavior and sport* (Vol. 1). Champaign, IL: Human Kinetics.

- [Sie99] Siegrist, S. (Ed.) (1999). *Driver training, testing and licensing - towards theory-based management of young drivers' injury risk in road traffic*. Results of EU-Project GADGET, work package 3 (Bfu-Report 40). Bern: Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (Bfu).
- [SJ03] Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). *An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning systems*. JSAE Review, 24(2003), 65-70.
- [SK08] Schmidt, G., Kiss, M. (2008). *Controllability für Lenkeingriffe bei Lenksystemen - Ein Vorgehen zur Prüfung der Übersteuerbarkeit von Zusatzlenkmomenten durch den Fahrer*. In GZVB (Hrsg.), AAET 2008 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Braunschweig: GZVB. 12. - 14. Februar 2008.
- [SLN97] Schumann, J., Löwenau, J., & Naab, K. (1997). *The Active Steering Wheel as a Continuous Support for the Driver's Lateral Control Task*. Vision in Vehicles 5, 1-9.
- [SRC+06] Switkes, J. P., Rossetter, E. J., Coe, I. A. und Gerdes, J. C. (2006). *Handwheel force feedback for lanekeeping assistance: Combined dynamics and stability*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Volume 128, Issue 3, pp. 532-542.
- [SS00] Sekuler, R. & Sekuler, A. B. (2000). *Vision and aging*. In: A. Kazdin (Hrsg.), Encyclopedia of Psychology. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.unet.brandeis.edu/~sekuler/ABSTRACTS/Encyclopedia.html> [23.02.06].
- [SSK+07a] Schmidt, G., Switkes, J. P., Kiss, M. & Gerdes, J. C. (2007). *Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System*. In GZVB (Hrsg.), AAET 2007 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Braunschweig: GZVB. 26. - 28. Februar 2007.
- [SSK+07b] Switkes, J. P., Schmidt, G., Kiss, M. & Gerdes, J. C. (2007). *Driver Response to Steering Torque Disturbances: A User Study on Assisted Lanekeeping*. In Proceedings of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Controls (AAC) 2007. August 20-22, Monterey Coast, CA.
- [SSN+06] Schmidt, G., Scholz, .S., Neukum, A., Krüger, H-P., Passek, J., Schrüllkamp, T., Wallentowitz, H. (2006) *Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen*. FAT-Schriftenreihe 208. Frankfurt a. M.
- [Sta08] Statistisches Bundesamt (2008). Fachserie 8, Reihe 7. Germany.
- [Ste75] Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: introduction to its perceptual, neural, and social aspects*. New York: John Wiley & Sons.
- [Sto92] Stoll, H. (1992). *Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen*. Würzburg: Vogel Verlag.

- [Str93] Strasser, H. (1993). *Kompatibilität*. In T. Hettinger und G. Wobbe (Hrsg.): Kompendium der Arbeitswissenschaft. Kiel Verlag, Ludwigshafen
- [STS+08] Schmidt, G., Talvala, K. R., Switkes, J. P., Kiss, M., Gerdes, J. C. (in press). *Changing Lanes with Activated Lanekeeping Assistance: A Simulator Study*. Proceedings of the HFES Human Factors for Assistance and Automation Annual Meeting 2007, October 24-26, Braunschweig.
- [Tau76] Taub, E. (1976). *Movements in nonhuman primates deprived of somatosensory feedback*. Exercise and Sport Sciences Reviews, 4, 335-374.
- [Tra04] Tränkle, U. (1994) (Hrsg.). *Autofahren im Alter*. Köln, 1994.
- [Tsu01] Tsuda, H. (2001, 12.02.2001). *Nissan Demos New Lane Keeping Products*. Link
30.09.2003:
http://www.ivsource.net/archivep/2001/feb/010212_nissandemo.html
- [Unb05] Unbehauen, H. (2005). *Regelungstechnik I*. 13. Auflage. Braunschweig: Vieweg
- [VBD00] van Winsum, W., Brookhuis, K. A., & De Waard, D. (2000). *A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving*. Accident Analysis & Prevention, 32(1), 47-56.
- [VDA04] VDA (2004). *Sicherheitsstandard für Elektrolenkungen*. VDA Arbeitskreis 3.1.1
- [VGT+96] de Vos, A. P., Godthelp, J., Theeuwes, J., & Verwey, W. B. (1996). *The Influence of a Heading Control System on Driver Workload* (TNO-report No. TM-96-C048): TNO Human Factors Research Institute.
- [VW07] VW (2007). *Selbststudienprogramm 389 – Der Parklenkassistent*. Volkswagen AG Service Training, Wolfsburg
- [Wal72] Wallner, F. (1972). *Untersuchungen am System Fahrzeug-Fahrer-Straße bei simuliertem Fahrzeug und simulierter Straße: Über den Einfluss unkonventioneller Lenksysteme auf die Lenkbarkeit des Fahrzeugs*. TU Berlin.
- [Wen00] Wenzel, L. (2000). *Kalman-Filter*. Elektronik, 6/2000, 64-75.
- [WEN+01] Wallentowitz, H., Ehmanns, D., Neunzig, D., & Weilkes, M. (2001). *Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, F35.
- [Wic84] Wickens, C.D. (1984). *Processing Resources in Attention*. In R. Parasuraman (Ed.). Varieties of Attention (S. 63-102). London: Academic Press.
- [YHI+96] Yuhara, N., Horiuchi, S., Iijima, T., Tajima, J., & Asanuma, N. (1996). *Synthesis and evaluations of driver assistance system for vehicle lateral guidance control*. Paper presented at the Proc. of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems.

- [YS97] Young, M. S., & Stanton, N. A. (1997). *Automotive Automation: Investigating the Impact on Drivers' Mental Workload*. International Journal of Cognitive Ergonomics(1 (4)), 325-336.
- [YS99] Young, M. S., & Stanton, N. A. (1999). *Miles Away: A New Explanation for the Effects of Automation on Performance*. Contemporary Ergonomics, 73-77.
- [Zom91] Zomotor, A. (1991). *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg
- [ZST98] Zhang, W., Shladover, S., Tan, H. (1998). *The PATH magnetic guidance system*. In PATH Intellimotion Newsletter 7.4 1998. Link from 04.11.2008: <http://www.path.berkeley.edu/PATH/Intellimotion/intel74.pdf>

